

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

CHANGEMENTS PROJETÉS DES VARIABLES HYDRIQUES POUR LE
CLIMAT FUTUR SUR L'AFRIQUE EN UTILISANT LE MODÈLE
RÉGIONAL CANADIEN DU CLIMAT VERSION 5 (MRCC5)

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR
ABDELLAH BOUJANNAH

SEPTEMBRE 2015

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier ma directrice de recherche, Pr. Laxmi Sushama, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet grâce à son intégrité et sa rigueur scientifique. Je veux aussi souligner l'aide précieuse de mes collègues Bessam Bouagila et de Mamadou Insa Diop permettant l'avancement de ce projet. J'aimerais aussi remercier tous mes professeurs, collègues et amis, particulièrement Éva Monteiro pour son soutien depuis le début de mes études au baccalauréat en sciences de la terre et de l'atmosphère jusqu'à finir par consacrer son temps à la lecture attentive de ce document. J'aimerais également remercier le Centre ESCER pour son soutien logistique et financier pour effectuer ce projet. Enfin, un merci spécial à mon épouse Fatima, à mes enfants et à Mamadou Insa Diop pour leur support infini.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTES DES ACRONYMES	xv
INTRODUCTION	
CHAPITRE I	
REVUE DE LITTÉRATURE	7
CHAPITRE II	
MODÈLE, DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE	17
2.1 Description du Modèle Régional Canadien du Climat, version 5 (MRCC5).....	17
2.2 Configuration des simulations	18
2.3 Description des données de validation	19
2.4 Méthodologie	20
CHAPITRE III	
ANALYSES DES RÉSULTATS	
3.1 Évaluation du modèle : Erreurs de performance du modèle	25
3.1.1 Précipitation.....	25
3.1.2 Humidité du sol.....	26
3.1.3 Ruissellement total	27
3.1.4 Évaporation	29
3.2 Erreurs dues aux conditions aux frontières	30
3.2.1 Précipitation.....	30
3.2.2 Humidité du sol.....	31
3.2.3 Ruissellement.....	32
3.2.4 Évaporation	33
3.3 Changements appréhendés.....	34
3.3.1 Changements projetés pendant l'été austral (JFM)	34

3.3.2 Changements projetés pendant l'été boréal (JAS)	35
CONCLUSION	39
FIGURES	42
ANNEXES	
ANNEXE A.....	67
Carte de l'Afrique avec les coordonnées latitudinales et longitudinales...	67
ANNEXE B.....	68
Données géophysiques de L'Afrique	68
ANNEXE C.....	71
Précipitation et ratio drainage/(ruissellement total)	71
ANNEXE D.....	74
Température de surface de la mer (SST) et les anomalies correspondantes	74
BIBLIOGRAPHIE	79

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1	Cartes des moyennes multimodèles de la cinquième phase du projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5) pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5 pour la période 2081– 2100 pour (a) le changement de la température en surface, (b) le changement moyen en pourcentage de la moyenne annuelle des précipitations, relatifs à la période 1986–2005. Le nombre de modèles CMIP5 utilisés pour calculer la moyenne multimodèle est indiqué dans l'angle supérieur droit de chaque image. Les hachures signalent les régions dans lesquelles la moyenne multimodèle est faible par rapport à la variabilité interne (i.e. moins d'un écart-type de la variabilité interne sur des moyennes de 20 ans). Les pointillés signalent les régions dans lesquelles la moyenne multimodèle est grande par rapport à la variabilité interne (i.e. supérieure à deux écarts-types dans les moyennes de 20 ans) et dans lesquelles 90 % des modèles s'accordent sur le signe du changement (RE5 du GIEC). Source RE5 du GIEC.....	2
2	Évolution du forçage radiatif anthropique (w/m^2) de 1800 à 2500 en fonction des différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Source RE5 du GIEC.....	6
1.1	Moyenne saisonnière de précipitation (JAS, 1997-2008) par MRCC5/ERA-interim, CRU et la différence entre MRCC5 et CRU. Source Hernandez-Diaz et al., 2012.....	10
1.2	Cycle diurne de Précipitation de l'été boréal (JAS) pour la période 2003-2008, dans le nord de l'Afrique de l'Ouest (7.58–158N, 108W–108E). Source Nikulin et al., 2012.....	11
1.3	Changements projetés des moyennes saisonnières des précipitations pour l'été boréal (JAS) par MRCC5/CanESM2 et CanESM2. Source Laprise et al. 2013.....	13

1.4	Changements projetés du nombre de jours secs pour l'été austral (JFM) simulé par CanESM2 et par MRCC5 piloté par CanESM2 selon le scénario RCP 4.5 et 2 mm de seuil de précipitation. Les points de la grille où les changements prévus ne sont pas statistiquement significatifs à une valeur de confiance de 95% sont présentés avec la couleur blanche. Source Bouagila and Sushama, 2013.....	15
1.5	Changements prévus par MPI-ESM et REMO de la moyenne annuelle des précipitations (%) pour la période 2070-2099 par rapport à la période 1970-1999. Source Saeed et al., 2013.....	16
3.1	Moyenne saisonnière des précipitations durant l'été austral (JFM) (1 ^{ère} ligne) et l'été boréal (JAS) (2 ^{ème} ligne) pendant la période 1984-2008, à partir des données CRU (à gauche), de la simulation du MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-Intérim (au milieu) et la différence entre MRCC5/ERA-Interim et CRU (à droite).....	43
3.2	Moyenne saisonnière de l'humidité du sol au premier niveau (0-10 cm) durant l'été austral (JFM) (1 ^{ère} ligne) et l'été boréal (JAS) (2 ^{ème} ligne) pendant la période 1984-2008, à partir des données GLDAS (à gauche), de la simulation du MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-Intérim (au milieu), et la différence entre MRCC5/ERA-Interim et GLDAS (à droite)	44
3.3	Moyenne saisonnière de ruissellement total durant l'été austral (JFM), pendant la période 1984-2008, à partir des données GRDC (en haut à gauche), des données GLDAS (en bas à gauche), de la simulation du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/ERA-Intérim – GRDC) et (MRCC5/ERA-Intérim – GLDAS) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite).....	45
3.4	Moyenne saisonnière de ruissellement total durant l'été boréal (JAS), pendant la période 1984-2008, à partir des données GRDC (en haut à gauche), des données GLDAS (en bas à gauche), de la simulation du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/ERA-Intérim – GRDC) et (MRCC5/ERA-Intérim – GLDAS) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite).....	46
3.5	Moyenne saisonnière de l'évaporation durant l'été austral (JFM) (1 ^{ère} ligne) et l'été boréal (JAS) (2 ^{ème} ligne) pendant la	

<p>période 1984-2008, à partir des données GLDAS (à gauche), de la simulation du MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-Intérim (au milieu), et la différence entre MRCC5/ERA-Interim et GLDAS (à droite).....</p>	47
<p>3.6 Moyenne saisonnière de précipitation durant l'été austral (JFM), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)</p>	48
<p>3.7 Moyenne saisonnière de précipitation durant l'été boréal (JAS), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)</p>	49
<p>3.8 Moyenne saisonnière de l'humidité du sol à tous les niveaux durant l'été austral (JFM), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)</p>	50
<p>3.9 Moyenne saisonnière de l'humidité du sol à tous les niveaux durant l'été boréal (JAS), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI-MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)</p>	51
<p>3.10 Moyenne saisonnière de ruissellement total durant l'été austral (JFM), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)</p>	52
<p>3.11 Moyenne saisonnière de ruissellement total durant l'été boréal</p>	

- (JAS), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite) 53
- 3.12 Moyenne saisonnière de l'évaporation durant l'été austral (JFM), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite) 54
- 3.13 Moyenne saisonnière de l'évaporation durant l'été boréal (JAS), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite) 55
- 3.14 Changements appréhendés des précipitations (ligne 1), du ruissellement total (ligne 2), de l'humidité du sol (ligne 3), de l'évaporation (ligne 4) et du nombre de jours de précipitations extrêmes (ligne 5); simulés par MRCC5/CanESM2; pendant les périodes moyennées en été austral JFM : (2041-2070)-(1981-2010) (colonne 1) et (2071-2100)-(1981-2010) (colonne 2). Les points de la grille où les changements prévus ne sont pas statistiquement significatifs à une valeur de confiance de 95% sont présentés avec la couleur blanche..... 56
- 3.15 Changements appréhendés des précipitations (ligne 1), du ruissellement total (ligne 2), de l'humidité du sol (ligne 3), de l'évaporation (ligne 4) et du nombre de jours de précipitations extrêmes (ligne 5); simulés par MRCC5/MPI; pendant les périodes moyennées en été austral JFM : (2041-2070)-(1981-2010) (colonne 1) et (2071-2100)-(1981-2010) (colonne 2). Les points de la grille où les changements prévus ne sont pas statistiquement significatifs à une valeur de confiance de 95% sont présentés avec la couleur blanche..... 57
- 3.16 Changements appréhendés des précipitations (ligne 1), du ruissellement total (ligne 2), de l'humidité du sol (ligne 3), de l'évaporation (ligne 4) et du nombre de jours de précipitations

extrêmes (ligne 5); simulés par MRCC5/CanESM2; pendant les périodes moyennées en été austral JAS : (2041-2070)-(1981-2010) (colonne 1) et (2071-2100)-(1981-2010) (colonne 2). Les points de la grille où les changements prévus ne sont pas statistiquement significatifs à une valeur de confiance de 95% sont présentés avec la couleur blanche. Les cercles rouges représentent la région de signaux contradictoires entre les deux simulations (MRCC5/CanESM2 et MRCC5/MPI) 58

- 3.17 Changements appréhendés des précipitations (ligne 1), du ruissellement total (ligne 2), de l'humidité du sol (ligne 3), de l'évaporation (ligne 4) et du nombre de jours de précipitations extrêmes (ligne 5); simulés par MRCC5/MPI; pendant les périodes moyennées en été austral JAS : (2041-2070)-(1981-2010) (colonne 1) et (2071-2100)-(1981-2010) (colonne 2). Les points de la grille où les changements prévus ne sont pas statistiquement significatifs à une valeur de confiance de 95% sont présentés avec la couleur blanche. Les cercles rouges représentent la région de signaux contradictoires entre les deux simulations (MRCC5/CanESM2 et MRCC5/MPI) 59
- 3.18 Évolution temporelle de précipitation de 1990 à 2090 dans la région encerclée en rouge, simulé par MRCC5/CanESM2 (en rouge) et par MRCC5/MPI (en bleu)..... 60
- 3.19 Évolution temporelle de ruissellement total de 1990 à 2090 dans la région encerclée en rouge, simulé par MRCC5/CanESM2 (en rouge) et par MRCC5/MPI (en bleu)..... 61
- 3.20 Évolution temporelle de l'humidité du sol de 1990 à 2090 dans la région encerclée en rouge, simulé par MRCC5/CanESM2 (en rouge) et par MRCC5/MPI (en bleu)..... 62
- 3.21 Évolution temporelle de l'évaporation de 1990 à 2090 dans la région encerclée en rouge, simulé par MRCC5/CanESM2 (en rouge) et par MRCC5/MPI (en bleu)..... 63
- 3.22 Évolution temporelle de la température de l'air de 1990 à 2090 dans la région encerclée en rouge, simulé par MRCC5/CanESM2 (en rouge) et par MRCC5/MPI (en bleu)..... 64
- 3.23 Évolution temporelle du nombre de jours de précipitations extrêmes de 1990 à 2090 dans la région encerclée en rouge, simulé par MRCC5/CanESM2 (en rouge) et par MRCC5/MPI (en bleu)..... 65

A.1	Carte de l'Afrique avec les coordonnées latitudinales et longitudinales. La partie hachurée en jaune représente l'Afrique de l'Ouest. Les numéros montrés sur la carte identifient les pays suivants : 1-Sénégal, 2-Mali, 3-Niger, 4-Tchad, 5-Soudan, 6-Ethiopie, 7-Somalie, 8-Nigeria, 9-Cameroun, 10-Gabon, 11-Congo, 12-R. D. du Congo 13-Tanzanie, 14-Angola, 15-Mozambique, 16-Madagascar, 17-Afrique du sud, 18-Golfe de Guinée	67
B.1	Fractions en [%] du sable, d'argile et de la porosité du sable dans les trois premières couches (0.10 cm, 0.25 cm et 3.75 cm) du domaine d'étude (Afrique) utilisé par MRCC5	68
B.2	Profondeur du bedrock de l'Afrique utilisée par MRCC5 Source Webb et al. (1991).....	69
B.3	Fractions en [%] de la couverture des types de la végétation en Afrique utilisé par MRCC5.....	70
C.1	Moyenne saisonnière des précipitations (1984-2008) simulées par MRCC5/ERA-Interim (ligne 1, colonne 1), et assimilées par GLDAS (ligne 1, colonne 2) en JFM. Moyenne saisonnière du ratio drainage/ruissellement total simulé par MRCC5/ERA-Interim (ligne 2, colonne 1), et assimilé par GLDAS (ligne 2, colonne 2) en JFM	71
C.2	Moyenne saisonnière des précipitations (1984-2008) simulées par MRCC5/ERA-Interim (ligne 1, colonne 1), et assimilées par GLDAS (ligne 1, colonne 2) en JAS. Moyenne saisonnière du ratio drainage/ruissellement total simulé par MRCC5/ERA-Interim (ligne 2, colonne 1), et assimilé par GLDAS (ligne 2, colonne 2) en JAS	72
C.3	Moyenne saisonnière des précipitations (1984-2008) assimilées par GLDAS en JFM (ligne 1, colonne 1), en JAS (ligne 2, colonne 1) et simulées par le MRCC5/ERA-Interim en JFM (ligne 1, colonne 2), en JAS (ligne 2, colonne 2). La différence du MRCC5/ERA-Interim par rapport à GLDAS en JFM (ligne 1, colonne 3), en JAS (ligne 2, colonne 3).....	73
D.1	Moyenne saisonnière de la SST (1984-2008) en JFM simulée par le MRCC5/ERA-Interim (en haut à gauche), par MRCC5/CanESM2 (au milieu à gauche) et par MRCC5/MPI (en bas à gauche). La différence entre MRCC5/CanESM2 et MRCC5/ERA-Interim (au milieu à droite), entre MRCC5/MPI et MRCC5/ERA-Interim (en bas à droite)	74

- D.2 Moyenne saisonnière de la SST(1984-2008) en JAS simulée par le MRCC5/ERA-Interim (en haut à gauche), par MRCC5/CanESM2 (au milieu à gauche) et par MRCC5/MPI (en bas à gauche). La différence entre MRCC5/CanESM2 et MRCC5/ERA-Interim (au milieu à droite), entre MRCC5/MPI et MRCC5/ERA-Interim (en bas à droite) 75
- D.3 Moyenne saisonnière de la température de surface de la mer en JFM (1984-2008), Simulée par MRCC5/ERA-Interim (colonne 1), par MRCC5/CanESM2 (colonne 2), et par MRCC5/MPI (colonne 3) pour la période courante C (ligne 1), la période futur 1 F1 (ligne 2) et la période futur 2 F2 (ligne 3). Les changements appréhendés de la moyenne saisonnière de la SST sont présentés durant la période F1 (ligne 4), et la période F2 (ligne 5)..... 76
- D.4 Moyenne saisonnière de la température de surface de la mer en JAS (1984-2008), simulée par MRCC5/ERA-Interim (colonne 1), par MRCC5/CanESM2 (colonne 2), et par MRCC5/MPI (colonne 3) pour la période courante C (ligne 1), la période futur 1 F1 (ligne 2) et la période futur 2 F2 (ligne 3). Les changements appréhendés de la moyenne saisonnière de la SST sont présentés durant la période F1 (ligne 4), et la période F2 (ligne 5)..... 77

[Cette page a été laissée intentionnellement blanche]

LISTES DES ACRONYMES

AMMA	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
CORDEX	COordinated Regional climate Downscaling Experiment
C	période de Contrôle (1981-2010)
CanESM2	Canadian Earth System Model
CEPMET	Centre européen de prévision météorologique à moyen terme
CLM	Community Land Model
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CRU	Climate Research Unit
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA-Interim	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis
ESCC	Centre pour l'Étude et la Simulation du Climat à l'Échelle Régionale
Evap	Évaporation
F1	Période future 1 (2041-2070)
F2	Période future 2 (2071-2100)
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GLDAS	Global Land Data Assimilation System
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GRDC	Global Runoff Data Centre
JAS	Juillet-Aout-Septembre
JFM	Janvier-Février-Mars
MCG	Modèle de Circulation Générale

MOA	Mousson Ouest Africaine
Mosaic	Measurement of OZone and water vapour by Airbus in-service airCraft
MPI	Max-Planck-Institut für Meteorologie
MRC	Modèle Régional du Climat
MRCC5	Modèle Régional Canadien du Climat version 5
MRCC5/CanESM2	MRCC5 piloté par CanESM2
MRCC5/MPI	MRCC5 piloté par MPI
MRCC5/ERA-Interim	MRCC5 piloté par ERA-Interim
P	Porosité
PR	Précipitation
R.D.	République Démocratique
RCP	Representative Concentration Pathway
RE4	4 ^e rapport d'évaluation du GIEC
RE5	5 ^e rapport d'évaluation du GIEC
REMO	Regional Model (MPI)
Runoff	Ruissellement Total
SHL	Saharian Heat Low
SoilM	Humidité du Sol
SST	Sea Surface Temperature
STN-30p	Simulated Topological Network
TSM	Température de la Surface de la Mer
UQÀM	Université du Québec à Montréal
VIC	Variable Infiltration Capacity
WAM	West African Monsoon
ZCIT	Zone de Convergence Intertropicale

RÉSUMÉ

Cette étude a pour objectif d'évaluer les erreurs de performances et les erreurs dues aux conditions aux frontières du MRCC5 ainsi présenter les changements climatiques futurs dans le continent africain, pour les variables hydriques: précipitation, humidité du sol, ruissellement total et évaporation.

Les erreurs de performance sont tout d'abord discutées en comparant les simulations du MRCC5/ERA-Interim à des bases de données d'observations et d'analyses disponibles (CRU, GRDC, GLDAS), sur la période 1984-2008. Les erreurs dues aux conditions aux frontières sont estimées en comparant les simulations du MRCC5 piloté par deux modèles de circulation générale CanESM2 et MPI avec les simulations du MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-Interim.

Dans un contexte de changement climatique et selon le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP4.5, des changements appréhendés sont présentés à partir des simulations du MRCC5 piloté par les deux MCG pendant deux périodes futures de 30 ans chacune (2041-2070, 2071-2100), la période de contrôle étant de 1981 à 2010.

Les résultats montrent que le MRCC5/ERA-Interim reproduit assez bien la distribution spatiotemporelle des variables hydriques sélectionnées. Toutefois, la simulation du MRCC5/ERA-Interim présente des erreurs non négligeables généralement positives dans les régions côtières particulièrement dans les régions au voisinage du Golf de Guinée, et négatives dans le Sahel. Les erreurs dues à l'utilisation des conditions aux frontières sont moins importantes que les erreurs de performance.

Quant aux changements appréhendés, une augmentation des précipitations et du ruissellement total est prévue en JAS dans le sud de l'Afrique de l'Ouest et le sud de l'Éthiopie, particulièrement plus intense pendant la deuxième période future. Cette augmentation n'est accompagnée par aucun changement d'humidité du sol, qui est probablement lié à l'augmentation du nombre de jours de précipitation extrême prévue dans les mêmes régions et pendant les mêmes périodes. En revanche, une diminution des précipitations, du ruissellement et du nombre de jours de précipitation extrême prévue en été austral (janvier-mars, JFM) aux frontières entre la Tanzanie et la R.D. Du Congo, lui correspond une diminution de l'humidité du sol.

Mots clés: modèle régional, simulation, changements climatiques, Afrique

INTRODUCTION

Le changement climatique (CC) est aujourd'hui un sujet de préoccupation majeur pour l'ensemble de la communauté internationale. À la suite de nombreuses études, on peut affirmer avec une quasi-certitude que la cause prédominante de la hausse des températures globales moyennes de surface enregistrées pendant les dernières décennies est d'origine anthropique. La cause étant l'augmentation de la concentration de gaz à effets de serre (GES) liée aux activités humaines. Le 5^{ème} rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) alerte la communauté internationale d'une tendance à l'augmentation de la température partout dans le monde (Figure 1 (a)) qui aura comme conséquence l'augmentation très probable de la fréquence et de l'intensité des aléas météorologiques majeurs comme les inondations et les sécheresses. Le rapport prévoit des changements de précipitations extrêmes d'ici la fin du XXI^e siècle. En général, les régions humides deviennent plus humides et les régions sèches deviennent plus sèches. Les changements projetés dépendent des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre choisis. Selon les scénarios d'émissions élevées, certains endroits recevront jusqu'à 50% plus de précipitations, tandis que d'autres recevront jusqu'à 30% de moins (Figure 1 (b)). L'amplitude des changements est moins importante dans les scénarios de faibles émissions.

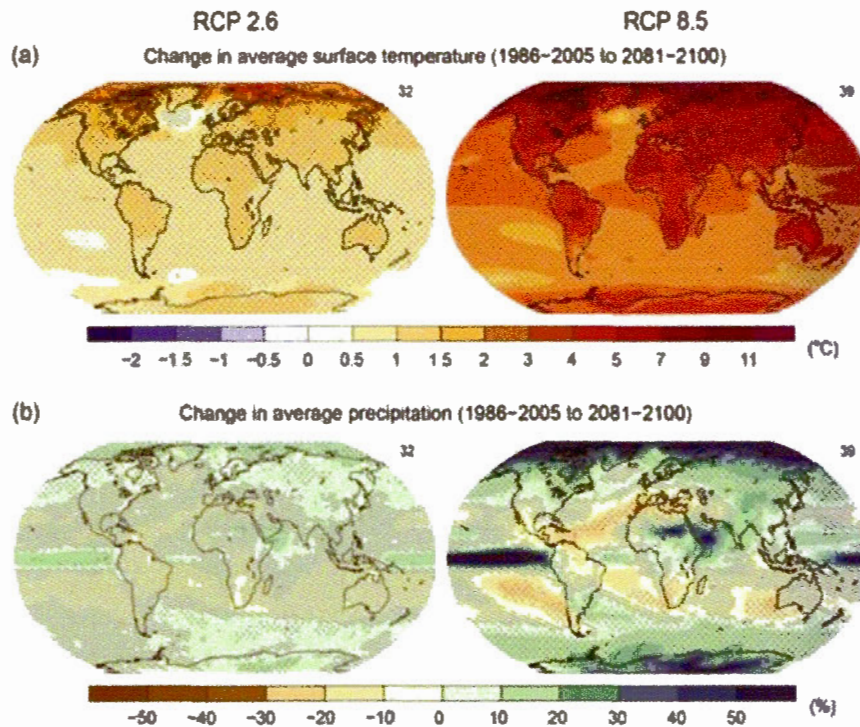


Fig. 1 Cartes des moyennes multimodèles de la cinquième phase du projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5) pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5 pour la période 2081– 2100 pour (a) le changement de la température en surface, (b) le changement moyen en pourcentage de la moyenne annuelle des précipitations, relatif à la période 1986–2005. Le nombre de modèles CMIP5 utilisés pour calculer la moyenne multimodèle est indiqué dans l'angle supérieur droit de chaque image. Les hachures signalent les régions dans lesquelles la moyenne multimodèle est faible par rapport à la variabilité interne (i.e. moins d'un écart-type de la variabilité interne sur des moyennes de 20 ans). Les pointillés signalent les régions dans lesquelles la moyenne multimodèle est grande par rapport à la variabilité interne (i.e. supérieure à deux écarts-types dans les moyennes de 20 ans) et dans lesquelles 90 % des modèles s'accordent sur le signe du changement (RE5 du GIEC). Source RE5 du GIEC

Ce rapport conclue également que les régions du monde les moins développées seront plus éprouvées par le CC. Les changements attendus en Afrique pourraient être dramatiques, étant donné qu'un tel bouleversement climatique affecte les ressources alimentaires, hydriques, financières..., et aura donc des répercussions majeures sur la population qui connaît une augmentation continue.

Les projections futures du climat sont obtenues par les modèles de circulation générale (MCG). Cependant, étant donné leur basse résolution, ils ne sont pas adéquats pour plusieurs études (e.g. études d'impacts et d'adaptation) qui font intervenir souvent l'échelle locale/régionale. À cette échelle, il est nécessaire d'avoir des simulations à hautes résolutions. L'outil utilisé pour cet effet est le modèle régional du climat (MRC). L'amélioration des processus par le MRC par rapport au MCG, souvent à petite échelle, est appelé la valeur ajoutée. L'utilisation du MRC donnerait alors des résultats plus réalistes pour les projections. Mais il faut avoir une certaine réserve, étant donné que le MRC est piloté par les simulations, à basse résolution, du MCG. En plus, il reste encore beaucoup de travail à faire dans la validation des MRC, surtout en Afrique où les données d'observations, en particulier des données à haute résolution, sont rares. Également, la diversité des régimes climatiques de l'Afrique, couvrant les tropiques et les latitudes moyennes des deux hémisphères, représente un défi considérable pour les modèles climatiques (IPCC AR4 2007).

Au cours des dernières années, il y a eu un intérêt remarquable auprès des chercheurs pour l'étude du climat de l'Afrique. Ils essayent d'expliquer les mécanismes qui engendrent la variabilité climatique afin de trouver des moyens d'adaptation adéquats pour faire face au CC. Le Sahel est parmi les régions de l'Afrique les plus touchées par ces changements, son climat s'est toujours caractérisé par l'extrême variabilité saisonnière et décennale des précipitations. Cette variabilité est probablement due à des interactions complexes entre plusieurs processus.

Cependant, aucun processus ne peut pas expliquer à lui seul la variabilité observée. Aujourd'hui il est toujours difficile d'évaluer cette variabilité même en connaissant l'un de ses facteurs climatiques dominants qui est la mousson ouest africaine (MOA; WAM en anglais). En effet, les interactions complexes entre l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère semblent contrôler la dynamique de la MOA et le cycle de vie des systèmes pluviométriques. Des études de modélisation montrent que les océans (Semazzi et al. 1996), la couverture végétale (Zheng et Eltahir, 1998 ; Wang et Eltahir, 2000) et la topographie (Semazzi et Sun, 1997) semblent jouer un rôle important dans l'établissement de la circulation de la mousson sur l'Afrique de l'Ouest.

Plusieurs programmes de recherche sont motivés par le besoin de mieux décrire et comprendre les modes de variabilité du climat de l'Afrique afin de parvenir à de meilleures projections et de fournir une aide à la décision aux utilisateurs (e.g. la planification et l'orientation de la stratégie agricole). On cite à titre d'exemple :

AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) (Redelsperger et al. 2006), qui a débuté en 2002. Ce programme s'appuie sur une forte coordination internationale de différentes activités incluant des recherches fondamentales et des campagnes de mesures sur plusieurs années.

CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment) qui est un exercice coordonné de simulations numériques du climat mis en œuvre conjointement par plusieurs centres de recherches dans le but de produire des scénarios de changements climatiques à l'échelle régionale à des fins d'études d'impact en utilisant des modèles climatiques régionaux (MRC). Douze régions, couvrant la plupart des zones terrestres peuplées dans le monde, ainsi que l'Arctique et l'Antarctique, ont été définies dans CORDEX, y compris la région d'Afrique qui est particulièrement vulnérable aux changements climatiques (Nikulin et al. 2006). La communauté CORDEX a grandi pour inclure actuellement 14 domaines y compris les

régions du Moyen Orient et le Nord d'Afrique (MENA-CORDEX), en plus du Sud-Est de l'Asie (South East Asia CORDEX). (Source: CORDEX Newsletter Issue 2 October 2013).

Dans le cadre de CORDEX, le Modèle Régional Canadien du Climat version 5 (MRCC5) a été évalué par Hernandez-Diaz et al. (2012) et Laprise et al. (2013) sur l'Afrique pour la température et la précipitation, et les changements appréhendés ont été étudiés par Laprise et al. (2013).

L'objectif de ce projet est d'évaluer le MRCC5 sur l'Afrique (voir annexe A Fig.A1). Les variables d'intérêt sont les variables hydriques : précipitation, humidité du sol, ruissellement total et évaporation. Certaines de ces variables, notamment l'humidité du sol, le ruissellement total et l'évaporation, n'ont pas été considérées dans les études récentes réalisées avec le MRCC5 en Afrique (e.g., Hernandez-Diaz et al. (2012), Laprise et al. (2013), Bouagila and Sushama (2013). Cette étude vise à évaluer les erreurs de performance et les erreurs dues aux conditions aux frontières. Nous allons également présenter les changements projetés par le MRCC5 pour ces variables. Les simulations du MRCC5 sont effectuées selon le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4,5) à une résolution de 0.44° .

RCP4.5 est l'un des scénarios relatifs à l'évolution de la concentration du gaz à effet de serre au cours du XXI^e siècle. Ces scénarios sont établis par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) pour fin des projections du changement climatique. Pour le 5^e rapport d'évaluation (RE5) du GIEC, la communauté scientifique a défini un ensemble de quatre scénarios, appelés profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP). Ces scénarios sont identifiés par leur forçage radiatif total approximatif pour l'année 2100 par rapport à 1750 comme suit : $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ pour le RCP2.6, $4,5 \text{ Wm}^{-2}$ pour le RCP4.5, $6,0 \text{ Wm}^{-2}$ pour le RCP6.0 et $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ pour le RCP8.5. Ces quatre RCP contiennent un scénario de mitigation conduisant à un niveau de forçage très bas (RCP2.6), deux scénarios de

stabilisation (RCP4.5 et RCP6.0), et un scénario aux concentrations très élevées (RCP8.5). Les RCP sont basés sur une combinaison de modèles d'évaluation intégrés, de modèles de climat simples, ainsi que sur des modèles de chimie atmosphérique et de cycle du carbone.

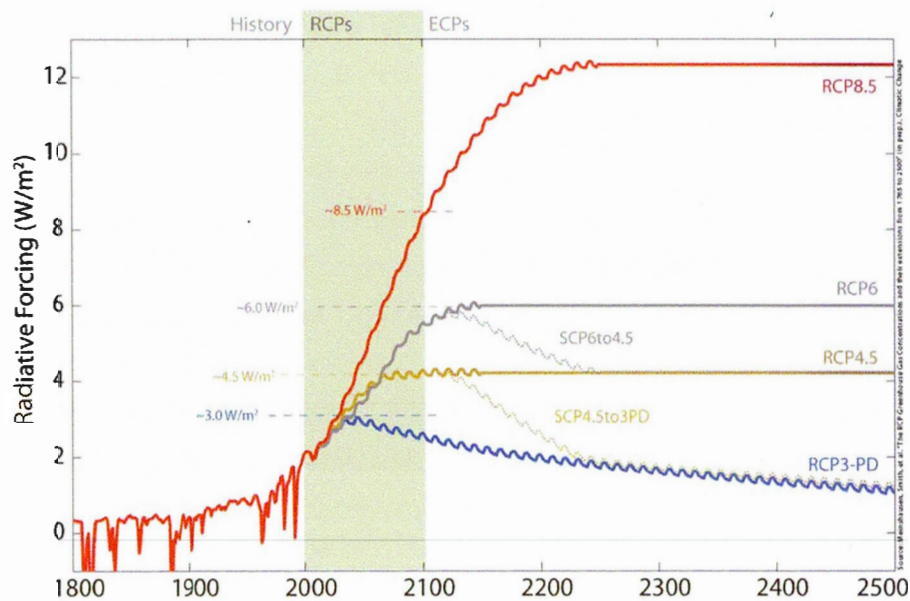


Fig. 2 Évolution du forçage radiatif anthropique (W/m^2) de 1800 à 2500 en fonction des différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Source RE5 du GIEC

CHAPITRE I

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre donne un aperçu de quelques études récentes liées à l'évaluation des performances des MCG et MRC à simuler le climat régional sur l'Afrique, ainsi qu'aux changements appréhendés du climat dans cette région.

On distingue en Afrique quatre types de régimes climatiques : (a) le climat équatorial (autour de l'équateur) qui est caractérisé par quatre saisons dont deux de pluies au Centre et à l'Ouest et deux saisons sèches à l'Est; (b) le climat tropical (entre les Tropiques, à l'exception de la zone équatoriale) qui est caractérisé par deux saisons dont une de pluie et une saison sèche. Dans cette région, la circulation des vents, connus sous le nom des alizés, est assez forte; (c) le climat désertique (près des Tropiques) que se distingue par une grande irrégularité de précipitations. La sécheresse peut dominer plusieurs années consécutives; et (d) le climat méditerranéen (aux extrémités du continent) qui est un climat tempéré avec une saison d'été chaude et sèche (l'inverse du tropical) et une saison d'hiver fraîche et pluvieuse.

À noter que les saisons humides et sèches sont modulées par la zone de convergence inter-tropicale (ZCIT) qui est un élément clé dans le climat africain. En hiver boréal (janvier-mars, JFM), la ZCIT se déplace plus au sud produisant d'importantes précipitations au sud de l'équateur, tandis que la sécheresse sévit au nord. En été boréal (juillet-septembre, JAS), la ZCIT migre vers le nord apportant des précipitations jusqu'aux latitudes 15° N dans le Sahel. Ces précipitations sont modulées par la mousson ouest africaine (MOA) qui est un flux de vent du sud-ouest induit par le contraste thermique entre le continent (Saharian Heat Low, SHL) et

l'est de l'Océan Atlantique Équatorial relativement plus froid (e.g., Thorncroft et al. 2010; Lafore et al. 2010).

Étant donné la diversité climatique de la région d'Afrique, les processus gouvernant les précipitations peuvent se révéler très complexes. Cette complexité diminue l'habileté des modèles climatiques à simuler de façon réaliste certaines caractéristiques qui modulent les précipitations, particulièrement la MOA qui est un élément clé pour le déclenchement des précipitations en Afrique de l'ouest. Le 4^e rapport d'évaluation du GIEC (RE4 du GIEC, 2007) a montré que les modèles climatiques ont des difficultés à reproduire les éléments clé du climat courant. Le rapport dévoile aussi le peu de consensus entre les modèles dans les projections climatiques. Plusieurs MCG ont du mal à capturer la MOA (Cook and Vizi, 2006).

Les MCG simulent généralement bien les caractéristiques à grande échelle et éprouvent des difficultés à saisir les détails à petite échelle en raison de leur résolution grossière. Ainsi, pour palier ce problème, les modèles régionaux du climat (MRC) ont été développés. Ces modèles contiennent des informations d'échelle régionale/locale qui sont généralement absentes dans les simulations des MCG.

Comme dans les simulations des MCG, plusieurs simulations des MRC ne réussissent pas à reproduire la moyenne saisonnière de l'intensité au centre du courant jet d'est africain (JEA). Comme le JEA résulte directement des gradients de température et d'humidité à la surface (Burpee, 1972; Cook, 1999; Thorncroft and Blackburn, 1999. Parker et al. 2005a, b) cela peut être une manifestation des difficultés éprouvées par les modèles dans une région de fort couplage entre la surface et l'atmosphère (Koster et al. 2006).

Au cours des dernières années, de nombreuses études réalisées avec des modèles climatiques, particulièrement des modèles régionaux, visent à mieux comprendre les changements climatiques appréhendés, notamment sur la région de l'Afrique (e.g., Nikulin et al. 2012; Laprise et

al. 2013; Bouagila and Sushama, 2013; Saeed et al. 2013). Deux principales sources d'erreurs peuvent affecter une simulation d'un MRC (e.g. GIEC, 2001; Sushma et al., 2006) : (a) l'erreur de performance due à la dynamique et à la physique interne du modèle régional, qui est obtenue en comparant la simulation du climat présent du modèle régional piloté par les réanalyses avec des données d'observations ; (b) l'erreur due aux conditions aux limites frontières (i.e, l'erreur associée aux erreurs des données de forçage), qui est obtenue en comparant la simulation du MRC piloté par un MCG avec celle du MRC piloté par les réanalyses.

Selon le RE4 du GIEC (2007), les modèles climatiques ont des difficultés à simuler correctement les principales caractéristiques du climat présent sur l'Afrique. Par conséquent, le rapport suggère la nécessité de mener des études plus approfondies afin de mieux comprendre les interactions entre les différentes composantes climatiques de cette région pour améliorer les simulations climatiques incluant les changements futurs.

Dans ce contexte, la performance du MRCC5 à reproduire certains aspects du climat a été évaluée par Hernandez-Diaz et al. (2012) dans le cadre du CORDEX. Cette étude a montré que le MRCC5 a bien réussi à reproduire les principales caractéristiques de la distribution spatiotemporelle de la température et de la précipitation à l'échelle saisonnière, ainsi que le cycle diurne de la précipitation et la mousson africaine (Fig. 1.1). Le MRCC5 a également bien capturé les maximums du cycle annuel de la précipitation qui résultent du double passage de la ZCIT. Cependant, le MRCC5 a du mal à simuler les précipitations assez loin au nord dans le Sahel, et présente quelques erreurs de timing et d'intensité dans le cycle diurne de la précipitation.

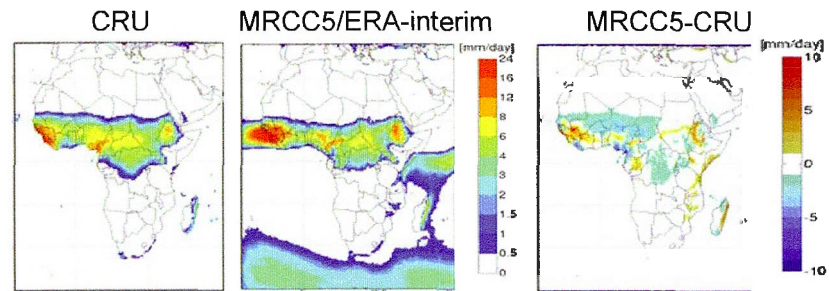


Fig. 1.1 Moyenne saisonnière de précipitation (JAS, 1997-2008) par MRCC5/ERA-interim, CRU et la différence entre MRCC5 et CRU. Source Hernandez-Díaz et al. 2012

Les résultats précédents concernant les cycles diurne et annuel des précipitations sur l'Afrique, sont consistents avec ceux trouvés par Nukulin et al. (2012). En effet, en utilisant un ensemble de 10 modèles régionaux y compris le MRCC5 et la simulation d'ensemble, cette étude montre que le MRCC5 est le seul modèle régional capable de reproduire la forme et l'amplitude du cycle diurne tel qu'il est observé (Fig. 1.2). L'étude montre aussi que le MRCC5 simule mieux le cycle annuel des précipitations que les autres modèles régionaux et que la simulation d'ensemble.

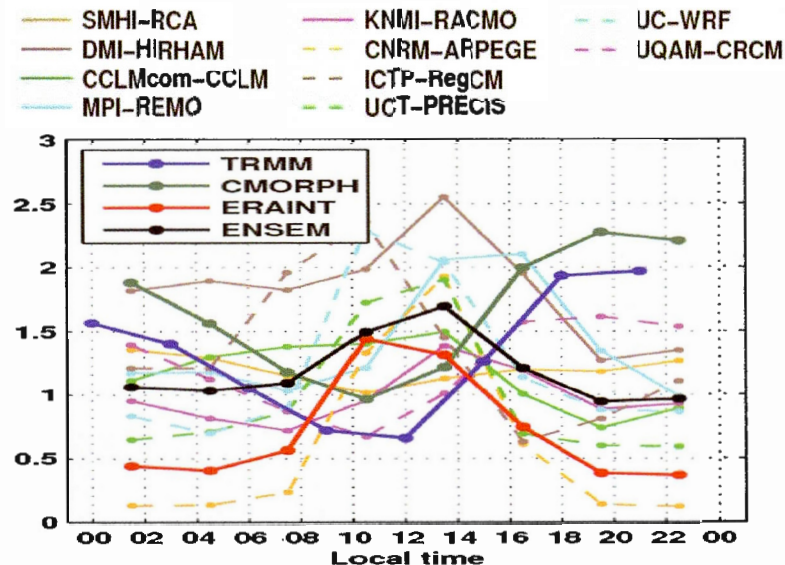


Fig. 1.2 Cycle diurne de Précipitation de l'été boréal (JAS) pour la période 2003-2008, dans Le nord de l'Afrique de l'Ouest (7.58–158N, 108W–108E). Source Nikulin et al. 2012

Les performances du MRCC5 sont également évaluées par Laprise et al. (2013) sur la région de l'Afrique, en analysant les moyennes saisonnières de la température et de la précipitation, les cycles annuel et diurne des précipitations, les distributions de l'intensité des précipitations journalières et la représentation de la mousson ouest africaine. En général, les biais de la température et de la précipitation montrés par le MRCC5 piloté par les MCG (CanESM2 ou MPI) sont moins importants que ceux des MCG. Cette étude a montré aussi que les erreurs dues aux conditions aux frontières, elles mêmes affectées par les erreurs de la température de la surface de la mer (TSM; SST en anglais), ont des conséquences nuisibles sur la capacité du MRCC5 à reproduire certaines caractéristiques spécifiques du climat régional comme, par exemple, la mousson africaine.

Quand aux changements appréhendés, et selon le RE4 du GIEC (2007), on s'attend à une intensification mondiale du cycle hydrologique dans un climat futur. En effet, un climat plus chaud est capable de garder plus de vapeur d'eau dans l'air, et le potentiel de précipitation et d'évapotranspiration augmente.

Une augmentation de la précipitation, de l'évaporation et du ruissellement de surface est prévue au centre de l'Afrique alors qu'une diminution de ces derniers aurait lieu dans le nord et dans le sud de l'Afrique (Nohara et al. 2006). Ces changements sont critiques pour un continent où la disponibilité en eau se fait de plus en plus rare.

Une diminution de 10% des précipitations dans les régions qui reçoivent une forte précipitation annuelle (1000 mm par an) peut réduire le ruissellement de surface de 17%, tandis que dans les régions qui reçoivent 500 mm par an, la même diminution de précipitation réduirait le ruissellement de surface de 50%. Ceci affectera de 25% l'accès aux eaux de surface de l'Afrique d'ici la fin de ce siècle (Maarten et al. 2006).

Des changements climatiques appréhendés par le MRCC5 pour une période allant jusqu'à la fin de ce siècle sont également analysés par Laprise et al. (2013). Les MRCC5/MCG et les MCG appréhendent, particulièrement en JAS, le rétrécissement de la bande de précipitation et l'intensification de son maximum, bien que les détails sur les changements prévus varient selon les modèles. L'étude montre que le MRCC5/CanESM2 prévoit une diminution des précipitations sur l'océan Atlantique équatorial et dans le golfe de Guinée particulièrement intense dans la seconde moitié du XXI^e Siècle (Fig. 1.3). Cette diminution va toucher aussi l'Afrique centrale, le Sud du Mali et le Sénégal. Cependant il y'aura intensification des précipitations au Sud du 15° N. Dans la même étude, le MRCC5/MPI prévoit également une diminution, moins importante, des précipitations au dessus de l'océan, au nord et au sud de la ZCIT, pour laquelle il y'a une augmentation de l'intensité de précipitation projetée. Le MRCC5/CanESM2 prédit une diminution de la précipitation

sur le Sahel. Cette diminution est plus prononcée dans la simulation du MRCC5/MPI. Tous les modèles simulent une augmentation des précipitations au dessus de l'océan sur la côte Ouest de l'Afrique, avec des intensités différentes, dont les plus importantes sont obtenues dans les deux simulations du MRCC5.

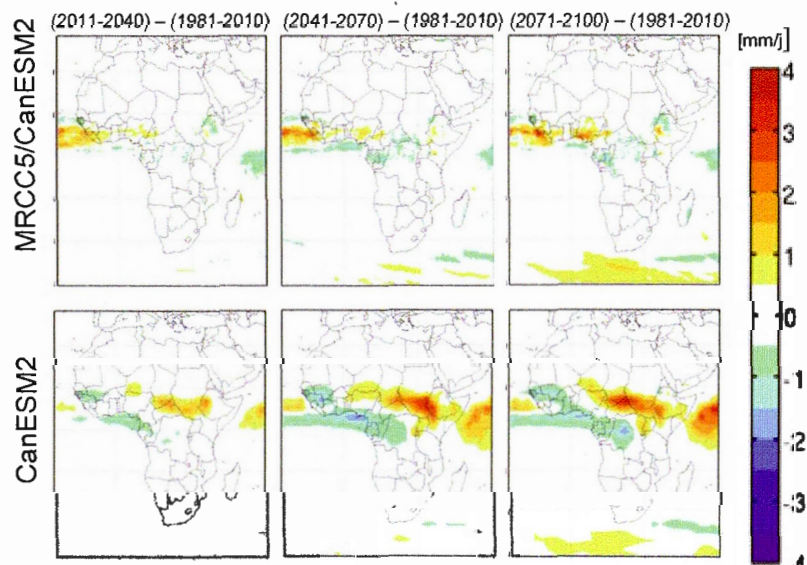


Fig. 1.3 Changements projetés des moyennes saisonnières des précipitations pour l'été boréal (JAS) par MRCC5/CanESM2 et CanESM2. Source Laprise et al. 2013

Laprise et al. (2013) étudient les changements climatiques appréhendés de la température pendant la saison JFM. Leur étude montre qu'une partie de l'Afrique de l'ouest et la région du bassin du Congo deviennent plus chaudes vers la fin du XXI^e siècle. Les intensités de ce réchauffement sont moins importantes par rapport à celles montrées par le modèle global pilote CanESM2. Le MRCC5/CanESM2 montre également un maximum de réchauffement sur l'Éthiopie et la Corne Africaine qui n'est pas aussi bien défini dans le CanESM2. D'autre part, lorsqu'il est piloté par le MPI, le MRCC5 montre des intensités de réchauffement semblables à celles montrées par le modèle global pilote

MPI. Ces intensités sont plus petites que celles prévues par le CanESM2 et par le MRCC5/CanESM2. Bien que les patrons de réchauffement du MPI et du MRCC5/MPI ne soient pas identiques, les deux modèles partagent une région de réchauffement en Afrique du sud, qui est cependant d'une plus grande intensité et extension dans le MPI.

Bouagila et Sushama (2013) ont évalué les changements projetés du nombre de jours secs (un jour est considéré sec si les précipitations quotidiennes lui correspondant n'ont pas excédé les seuils de 0.5, 1, 2 et 3 mm) simulés par le CanESM2 et par le MRCC5/CanESM2 durant la saison JFM, selon le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP4.5. Leur étude inclut deux périodes futures (2041-2070 et 2071-2100) et une période de contrôle (1981-2010). La figure 1.4 illustre le nombre de jours secs pour le seuil 2 mm. Le MRCC5/CanESM2 montre une augmentation significative de nombre de jours secs dans les régions tropicales centrales, alors qu'une diminution est prévue sur la Corne Africaine, particulièrement dans la 2^e période future. Le CanESM2 montre une augmentation significative de nombre de jours secs dans les tropiques centrales pendant la 1^e période future, suivie d'une diminution pendant la 2^e période future.

Bien que les deux modèles soient en accord sur la partie Est du Centre de l'Afrique où les diminutions significatives sont prévues pour les deux périodes futures, ils divergent pendant la 2^e période sur la région des tropiques de l'Ouest. En effet, le CanESM2 prévoit une diminution tandis que le MRCC5/CanESM2 prévoit une augmentation du nombre de jours secs. Une analyse de l'humidité du sol et de la précipitation dans la même région et durant la même période, montre une tendance croissante de la précipitation et de l'humidité du sol par le CanESM2, et une nette diminution par le MRCC5/CanESM2. Cela semble être la cause des résultats contradictoires obtenus par les deux modèles.

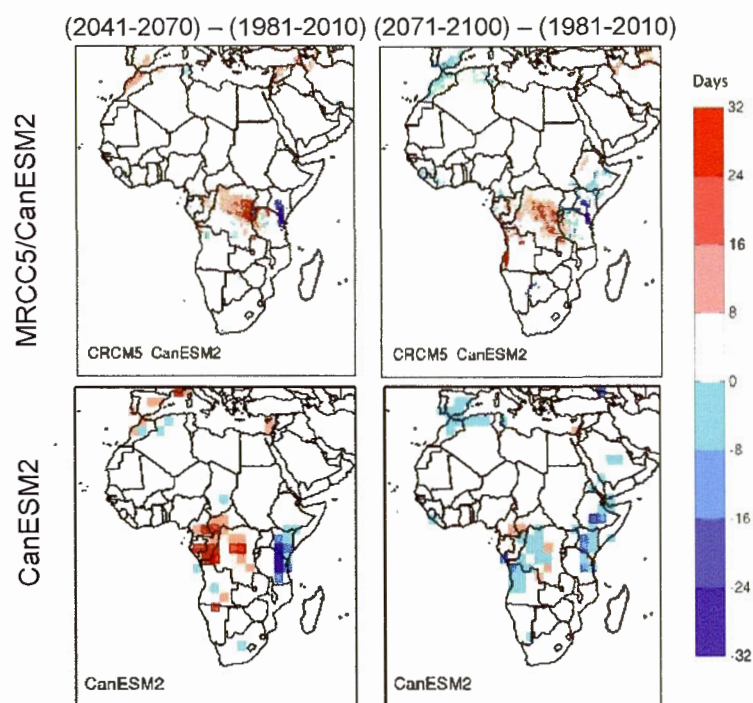


Fig. 1.4 Changements projetés du nombre de jours secs pour l'été austral (JFM) simulé par CanESM2 et par MRCC5 piloté par CanESM2 selon le scénario RCP 4.5 et 2 mm de seuil de précipitation. Les points de la grille où les changements prévus ne sont pas statistiquement significatifs à une valeur de confiance de 95% sont présentés avec la couleur blanche. Source Bouagila and Sushama, 2013

Toujours dans le contexte de changements appréhendés, Saeed et al. (2013), ont analysé les changements prévus par le modèle global MPI et le modèle régional (REMO) de la moyenne annuelle des précipitations (en %), pour la période 2070-2099 par rapport à la période 1970-1999 selon trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre: RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5. Cette étude a montré un conflit de signaux entre les deux modèles dans la grande région du Congo (Fig. 1.5).

On explique les changements sur cette région du Congo, là où REMO prévoit une diminution et MPI prévoit une augmentation des précipitations, comme suit : REMO simule un nombre d'événements de

précipitations extrêmes plus élevé que celui simulé par MPI. Cela se traduit par du ruissellement de surface plus élevé, et donc moins d'infiltration dans le sol. Ceci entraîne une diminution de quantité d'humidité du sol dans REMO qui conduit à moins de recyclage de l'humidité par évapotranspiration, et par conséquent, une diminution de précipitation sur la région. Contrairement à ce qui précède, et en raison de l'absence d'événements de précipitations extrêmes dans MPI, l'humidité du sol devient plus élevée. En présence d'un fort forçage radiatif sur la région, une quantité importante d'humidité du sol entraîne une augmentation d'évapotranspiration, qui entraîne à son tour une augmentation de la quantité de précipitation. Par conséquent, une représentation adéquate et l'amélioration des processus du sol dans les modèles climatiques est essentiel pour étudier les effets du changement climatiques.

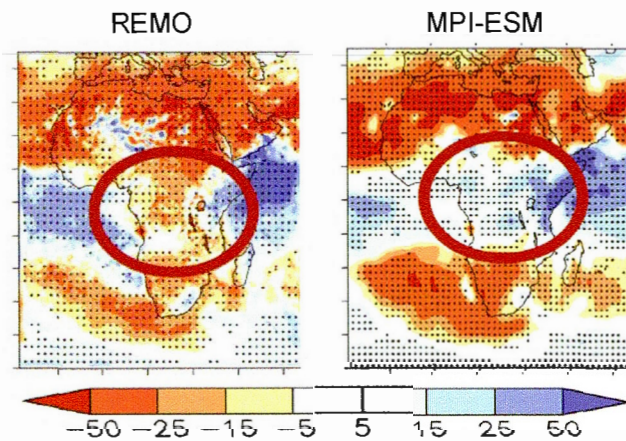


Fig. 1.5 Changements prévus par REMO (à gauche) et MPI-ESM (à droite) de la moyenne annuelle des précipitations (%) pour la période 2070-2099 par rapport à la période 1970-1999. Source Saeed et al. 2013

CHAPITRE II

MODÈLE, DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE

La section 2.1 décrit le modèle utilisé dans ce travail. La configuration des simulations est donnée dans la section 2.2. Il s'ensuit la description des différentes données utilisées pour la validation du modèle dans la section 2.3. La section 2.4 clôt le chapitre avec la présentation de la méthodologie.

2.1 Description du Modèle Régional Canadien du Climat, version 5 (MRCC5)

La cinquième génération du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC5; Martynov et al., 2013), développée au Centre pour l'Étude et la Simulation du Climat à l'Échelle Régionale (Centre ESCER) de l'Université du Québec à Montréal (UQAM), est basé sur une version à aire limitée du modèle Global Environmental Multi-scale (GEM; Zadra et al., 2008) utilisé pour la prévision numérique du temps à Environnement Canada (Côté et al., 1998). GEM utilise le schéma de transport semi-Lagrangien de discrétisation temporelle totalement implicite. Dans sa formulation non hydrostatique pleinement élastique (Yeh et al., 2002), il utilise une coordonnée verticale basée sur la pression hydrostatique (Laprise, 1992).

Les paramétrages physiques dans le MRCC5 sont les suivants :

- 1) la convection profonde de Kain and Fritsch (1990),
- 2) la convection peu profonde basée sur une version transitoire de Kuo (1965) et Bélair et al. (2005),
- 3) la condensation à grande échelle de Sundqvist et al. (1989),

- 4) les radiations terrestres et solaires corrélées-K de Li and Barker (2005),
- 5) la traînée des ondes orographiques sous-maîles de McFarlane (1987),
- 6) le blocage orographique de bas niveau de Zadra et al. (2003, 2012),
- 7) la paramétrisation de la couche limite selon Benoît et al. (1989), Delage and Girard (1992), Delage (1997) et Zadra et al. (2012).

Le schéma de surface du MRCC5 est le Canadian Land Surface Scheme version 3.5 (CLASS3.5, Verseghy 2000, 2008). Dans cette étude, une configuration de 26 couches de sol et une profondeur totale de 60 m est utilisée. Les distributions standard de sable et d'argile ainsi que les valeurs de l'albédo du sol nu de CLASS sont remplacés par les données ECOCLIMAP (Masson et al. 2003). Le modèle de lac Flake interactif est aussi utilisé dans le MRCC5 (voir Mironov et al. 2010; Martynov et al. 2012).

2.2 Configuration des simulations

Selon les recommandations de CORDEX, les simulations du MRCC5 sont réalisées sur le domaine de l'Afrique avec une résolution spatiale de 0.44° . À cette résolution, le pas de temps est de 20 minutes et le nombre total de points de la grille est de 236×241 , incluant les zones d'éponge et de pilotage qui nécessitent chacune 10 points de grille, nous laissant un domaine libre de 196×201 points.

Les simulations sont pilotées, d'une part, par les réanalyses ERA-Intérim qui sont disponibles pour les niveaux de pression à une résolution de 2° , et d'autre part, par deux simulations, selon le scénario d'émission

de gaz à effet de serre RCP 4.5, de la cinquième phase du projet d'inter-comparaison de modèles couplés (CMIP5) des MCG : CanESM2 et MPI.

La végétation dans CLASS est traitée de façon explicite en considérant cinq types de végétations: les feuillus, les conifères, les champs de culture, les prairies (herbe) et les environnements urbains (voir annexe B, Fig.B.3). CLASS subdivise chaque point de la grille en un maximum de quatre sous-régions: le sol sans végétation, sol avec végétation, neige sur le sol sans végétation et neige sur le sol avec végétation. Les propriétés du sol et les porosités correspondantes des trois premières couches sont montrées dans l'annexe B (Fig.B.1). Également la profondeur du bedrock du continent de l'Afrique est montrée par l'annexe B (Fig.B.2; Webb et al. 1991).

2.3 Description des données de validation

Les données d'observations permettent la validation du modèle. La précipitation (variable PR) simulée par le MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-Interim (MRCC5/ERA-Interim) est comparée aux données d'observations du Climat Resesarch Unit (CRU). Ces données mensuelles de précipitation proviennent des mesures de réseau d'observations de surface incluant plus de 4000 stations dans le monde. La résolution spatiale des données est de 0.5°, et elles sont disponibles depuis 1901 sur tous les continents (Mitchell and Jones, 2005; Mitchell et al., 2004).

Le modèle MRCC5/ERA-Interim est validé en confrontant le ruissellement total (runoff, en anglais) simulé aux données du Global Runoff Data Centre (GRDC). Ces données de ruissellement proviennent de la combinaison des données, simulées et observées, de débit de rivières. En effet, les données de débit enregistrées, sur une période de 12 ans et plus, à l'aide du réseau des stations de jaugeages sont combinées à celles simulées par le modèle du bilan hydrique et co-enregistrées au Simulated Topological Network (STN-30p) de l'Université

de New Hampshire. Dans les régions dépourvues d'observations de débit, le ruissellement observé, qui est donné par le rapport entre le débit moyen observé et l'aire inter-station (Fekete et al., 2000), est distribué uniformément sur toute la surface inter-station. Le ruissellement simulé est alors ajusté pour correspondre aux valeurs observées, tout en préservant la résolution spatiale et temporelle des valeurs simulées. Les données disponibles sont de trois types : observées, simulées et composites. Ces données mensuelles sont spatialisées sur tout le globe avec une résolution de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Dans notre étude, on utilisera les données composites, puisqu'elles donnent une estimation raisonnable du ruissellement à l'échelle continentale (Fekete et al., 2002).

Une autre base de données, Global Land Data Assimilation System (GLDAS) est également utilisée pour valider le ruissellement total. Ces données sont aussi utilisées pour valider l'humidité du sol (SoilM) et l'évaporation (Evap). Les données GLDAS sont produites par quatre modèles de surface terrestres : Community Land Model (CLM), Variable Infiltration Capacity (VIC), Mosaic et Noah. Elles intègrent également une grande quantité de bases de données d'observations. Ces données assimilées sont produites par les quatre modèles depuis 1979 jusqu'à présent, avec une résolution spatiale de 1° , et par le modèle Noah depuis 2000 jusqu'à présent, avec une résolution spatiale de 0.25° . Les données sont archivées à chaque trois heures, cependant elles sont moyennées pour produire des sorties mensuelles (Fang et al., 2009).

2.4 Méthodologie

Les variables hydriques traitées dans cette étude sont : la précipitation (PR), le ruissellement total (Runoff), l'humidité du sol (SoilM) et l'évaporation (Evap). Elles sont moyennées saisonnièrement, en été boréal (Juillet, Aout, Septembre (JAS)) et en été austral (Janvier, Février, Mars (JFM)).

Avant de procéder à une projection du climat, il est utile d'étudier la performance du modèle à simuler le climat présent. Comme suggéré par le GIEC (2001), deux principales sources d'erreurs peuvent affecter une simulation d'un MRC :

- Erreur de performance due à la dynamique et la physique interne du MRC. Cette erreur est quantifiée en comparant le climat présent simulé par le MRC piloté par les réanalyses avec des données d'observations disponibles.
- Erreur due aux conditions aux frontières. Cette erreur est quantifiée par comparaison de la simulation provenant du MRC piloté par un MCG avec celle issue du MRC piloté par les réanalyses (Sushama et al., 2006).

Pour évaluer les erreurs de performance du MRCC5, les sorties d'une simulation MRCC5/ERA-Interim ont été comparées aux données d'observation. Les moyennes saisonnières de la précipitation sont confrontées aux données d'observation CRU, le ruissellement aux données de GRDC et GLDAS et l'humidité du sol et de l'évaporation aux données GLDAS. Pour l'humidité du sol, seule la couche commune de 10 cm près de la surface est considérée. Les moyennes saisonnières sont effectuées pour une période de 1984-2008. Toutes les données sont interpolées sur la grille du modèle MRCC5 avec une interpolation arrondie (par plus proche voisin).

Pour évaluer les erreurs dues aux conditions aux frontières du MRCC5, on compare les moyennes saisonnières des quatre variables hydriques simulées par le MRCC5/CanESM2 et le MRCC5/MPI-ESM avec celles issues du MRCC5/ERA-Interim sur une période de 1984-2008.

Dans cette étude nous considérons les changements appréhendés dans deux périodes futures (F1:2041-2070 et F2:2071-2100), la période de contrôle (C) étant 1981-2010. Nous avons comparé les moyennes saisonnières des quatre variables hydriques simulées par le MRCC5/CanESM2 et par le MRCC5/MPI-ESM pendant les deux périodes futures F1 et F2, avec celles simulées par le même modèle pendant la période de contrôle C. Les changements projetés significatifs sont estimés en utilisant le student t-test avec un degré de confiance de 95%.

Le nombre de jours de précipitations extrêmes est défini dans cette étude comme le nombre de jours avec précipitation au dessus du 95^e percentile des données des précipitations journalières du Global Precipitation Climatology Project (GPCP) moyennées sur la période 1997-2012 en chaque point de la grille. Les données GPCP proviennent de la combinaison des données des précipitations estimées à l'aide des satellites géostationnaires et des réseaux d'observations de surface (pluviomètres), et sont spatialisées sur tout le globe à une résolution de 1° (Huffman et al., 2001).

Ainsi le nombre moyen de jours de précipitations extrêmes est calculé pour les trois périodes (C, F1 et F2) en comparant les taux de précipitations journalières simulées par MRCC5/CanESM2 et par MRCC5/MPI-ESM, au seuil (95^e percentile) de précipitations en chaque point de la grille. Les points de grille ayant un faible taux de précipitations sur une longue période (environ 95% de la période considérée) ne sont pas pris en considération dans le calcul du 95^e percentile.

Le principe du t-test est de calculer les moyennes de la distribution à chaque point de grille pour les périodes courante et future, puis les comparer. Si la différence est non nulle, les résultats des changements projetés sont significatifs à un degré de confiance souhaité (e.g, 95% pour notre étude). Dans ce cas, la valeur t correspondante à chaque point de grille est déterminée. La valeur de t dépend de la différence de la

moyenne (μ_d), de l'écart type (S_d) entre les deux distributions et du nombre d'échantillons (N), telle que décrite par l'équation (1) :

$$t = \frac{\mu_d \sqrt{N}}{S_d} \quad (1)$$

Les valeurs t^* des équations (2 et 3) permettent ainsi de déterminer les changements significatifs à un degré de confiance souhaité, Z :

$$t^* \geq \mu_d + Z_{\alpha/2} \frac{S_d}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

$$t^* \leq \mu_d - Z_{\alpha/2} \frac{S_d}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

où Z représente la confiance désirée selon une distribution normale. Le facteur Z dépend du paramètre α et des caractéristiques de la distribution normale, où $(1 - \alpha) \cdot 100$ est le degré de confiance. Dans notre cas, le degré de confiance de 95% correspond aux valeurs $\alpha = 0.05$ et $Z_{\alpha/2} = 1.96$.

[Cette page a été laissée intentionnellement blanche]

CHAPITRE III

ANALYSES DES RÉSULTATS

Dans ce chapitre, section 3.1, il sera question de l'évaluation des erreurs de performance du modèle en utilisant les quatre variables hydriques étudiées. Par la suite, l'analyse des erreurs dues aux conditions aux frontières est traitée dans la section 3.2. Et enfin, la section 3.3 présente une étude des changements appréhendés des quatre variables pour deux périodes en fin du siècle en cours.

3.1 Évaluation du modèle : Erreurs de performance du modèle

3.1.1 Précipitation

La figure 3.1 permet de comparer les précipitations moyennes saisonnières observées avec CRU et celles simulées par le MRCC5/ERA-interim, sur la période 1984-2008 durant les étés austral (JFM) et boréal (JAS).

Au cours de l'été austral, la zone de convergence inter-tropicale (ZCIT) se situe à sa position sud. Les observations montrent que les régions de forte précipitation se trouvent au Mozambique, au Malawi, en Tanzanie, en Zambie et au Gabon, avec un maximum de précipitation à Madagascar. Les simulations reproduisent généralement ces caractéristiques dans la plupart de ces régions. Cependant, le modèle surestime la précipitation dans les régions du Congo et du Gabon. On constate aussi des biais secs en Tanzanie, au nord de la R. D. du Congo et en Angola, et des biais humides au Gabon et dans la partie sud de

l'Afrique de l'Ouest. Le MRCC5/ERA-interim surestime les précipitations sur Madagascar.

Durant l'été boréal, la ZCIT se situe à sa position nord. Par conséquent, les précipitations sont surtout confinées sur une bande située entre l'Équateur et la latitude 15° N. La largeur de la bande est légèrement plus étroite dans le modèle MRCC5/ERA-Interim que dans les données d'observation CRU, ce qui entraîne un biais sec dans le Sahel, la R. D. du Congo ainsi que dans le Golfe de Guinée. Les données d'observation montrent trois maximums relatifs de précipitations : sur les hauts plateaux de Guinée, près de la frontière Nigéria-Cameroun et sur l'Éthiopie. Le modèle simule bien ces zones de fortes précipitations mais il a tendance à les surestimer. En outre, bien que la ZCIT soit située sur sa position nord, certaines régions dans l'hémisphère Sud (la côte Est de Madagascar et certaines parties de Mozambique) reçoivent des précipitations simulées non négligeables. Le MRCC5/ERA-Interim surestime alors les précipitations dans ces régions.

On peut conclure que le MRCC5 a réussi à bien reproduire la répartition moyenne des précipitations et, en particulier, la Mousson Ouest Africaine (MOA), mais il ne simule pas bien les précipitations assez loin au nord dans le Sahel.

3.1.2 Humidité du sol

À cause du manque des données d'observation de l'humidité du sol dans la région, les analyses GLDAS sont utilisées pour évaluer l'humidité du sol simulée par MRCC5/ERA-Interim.

La figure 3.2 compare les moyennes saisonnières de l'humidité du sol (de la couche près de la surface, 0-10 cm de profondeur) observées et simulées. Les analyses GLDAS montrent d'importantes valeurs d'humidité dans les régions tropicales sud durant l'été austral (JFM). Elles présentent

également des maximums relatifs à Madagascar, en Éthiopie et dans la partie Est de l'Afrique du Sud. Les simulations reproduisent faiblement ces caractéristiques. Le MRCC5/ERA-Interim ne reproduit pas bien les valeurs maximales dans les régions ouest des tropiques sud, de l'Éthiopie et de l'Est de l'Afrique du Sud. Dans ces régions, le modèle présente des biais secs. Le modèle présente également des biais secs dans les régions adjacentes à l'équateur, coté nord.

Au cours de l'été boréal (JAS), les simulations du modèle semblent plus réalistes. Le modèle reproduit en général la répartition moyenne de l'humidité du sol, incluant les valeurs maximales. Toutefois, la bande d'humidité est plus étroite dans les simulations du MRCC5 que dans les analyses GLDAS. Par conséquent, des biais secs apparaissent au Sahel, en R.D. du Congo et en Tanzanie. Cependant, le modèle semble légèrement surestimer les valeurs maximales sur la ZCIT, au Mozambique et à l'est de Madagascar.

Les différences des moyennes saisonnières de l'humidité du sol simulée par le MRCC5/ERA-Interim et assimilée par GLDAS pour les deux saisons (JFM et JAS), résultent des différences des moyennes saisonnières des précipitations correspondantes qui semblent bien se concorder entre elles (voir annexe C Fig.C.3). Cependant, autres facteurs comme la différence entre la formulation des sols du MRCC5/ERA-Interim et de GLDAS (qui n'est pas traitée dans cette étude) peuvent contribuer à ces différences.

3.1.3 Ruissellement total

Les figures 3.3 et 3.4 illustrent les moyennes saisonnières du ruissellement total calculées selon les analyses GRDC et GLDAS, et selon le MRCC5/ERA-Interim.

Les analyses ainsi que le modèle montrent généralement des faibles valeurs de ruissellement en JFM (Fig. 3.3). Le contraste entre les analyses GRDC et GLDAS peut être mis en évidence dans plusieurs régions. Ceci donne une indication sur les incertitudes associées aux données utilisées pour la validation. Les données GLDAS montrent des valeurs de ruissellement total moins importantes par rapport à celles de GRDC et à celles des simulations de MRCC5/ERA-Interim. Cependant, les analyses concordent bien à Madagascar. Dans cette région, le modèle surestime le ruissellement total de façon excessive par rapport aux deux bases de données. Le MRCC5/ERA-Interim le surestime également dans les régions du Congo et du Gabon en comparaison avec GRDC et GLDAS. Par contre, il a tendance à sous-estimer le ruissellement lorsque la performance du modèle est évaluée par rapport aux analyses GRDC. En revanche, la comparaison des simulations du modèle avec les analyses GLDAS montre plutôt une tendance à la surestimation.

Pendant l'été boréal (JAS) (Fig. 3.4), les analyses montrent trois zones de maximums de ruissellement qui sont situées sur la ZCIT et qui coïncident généralement avec les zones de maximums de précipitations.

Le modèle a bien reproduit les principales caractéristiques présentes dans les analyses particulièrement celles observées dans GRDC. Les zones où les valeurs maximales se produisent sont cependant beaucoup plus étendues dans les simulations. Le modèle surestime systématiquement le ruissellement lorsqu'il est comparé aux analyses GLDAS. Cette surestimation est également notée dans plusieurs régions lorsque les simulations sont comparées aux analyses GRDC. Dans les deux cas, les erreurs les plus fortes sont observées dans les régions adjacentes de la côte ouest, vers le sud de l'Afrique de l'ouest. Dans ces régions, les fortes valeurs de ruissellement pourraient être associées aux précipitations abondantes (en comparaison avec les précipitations de CRU) modulées par la mousson ouest africaine (MOA).

3.1.4 Évaporation

La figure 3.5 compare les valeurs moyennes de l'évaporation simulée par MRCC5/ERA-Interim et celles de GLDAS. Les zones de fortes valeurs d'évaporation coïncident généralement avec les zones de précipitations abondantes (annexe C Fig. C.3) et de maximum d'humidité du sol (Fig. 3.2). Durant toutes les saisons (JFM et JAS), le modèle simule des valeurs d'évaporation beaucoup plus faibles que celles assimilées par GLDAS avec des erreurs négatives atteignant les 2 mm/j, notamment au Gabon, au Congo et à la R.D du Congo pour l'été austral (JFM). Pendant l'été boréal (JAS) on observe la même chose en Afrique de l'Ouest et en Éthiopie. Les fortes erreurs positives observées dans plusieurs régions sont peu conséquentes car elles se produisent dans des régions de faibles valeurs d'évaporation.

Cependant, bien que le modèle montre des zones de précipitations plus abondantes et des valeurs de ruissellement total (Fig. 3.3, Fig. 3.4) et de drainage (annexe C Fig. C.1, Fig. C.2) plus fortes, les valeurs d'humidité simulées sont plus faibles, et par conséquent, les valeurs d'évaporation plus faibles. La différence entre les analyses GLDAS et le modèle pourrait être associée aux différences de leurs configurations et des paramétrisations des caractéristiques du sol utilisées. Cette voie n'est pas explorée puisqu'elle ne fait pas partie des objectifs fixés pour cette étude.

Les zones de fortes valeurs d'humidité du sol, de ruissellement et d'évaporation coïncident généralement avec les zones de fortes valeurs de précipitation. Les régions où on observe des erreurs dans les précipitations simulées coïncident également aux régions où on note des erreurs avec les autres variables étudiées. Ceci laisse croire qu'une amélioration dans les simulations des précipitations aura un impact positif

dans les simulations des autres variables, notamment l'humidité du sol, le ruissellement et l'évaporation.

3.2 Erreurs dues aux conditions aux frontières

3.2.1 Précipitation

Les figures 3.6 et 3.7 présentent les moyennes saisonnières des précipitations simulées par le modèle régional MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-Interim et par les modèles de circulation générale CanESM2 et MPI.

En été austral (JFM) (Fig. 3.6), la discussion sur la manière dont les précipitations sont distribuées a été déjà faite dans la section précédente (3.1.1), où nous avons comparé les simulations du MRCC5/ERA-Interim aux observations CRU. Le modèle piloté par les 2 MCG reproduit assez bien les principales caractéristiques observées dans les simulations pilotées par les réanalyses ERA-Interim. Toutefois, le MRCC5/CanESM2 et le MRCC5/MPI présentent des erreurs positives de l'ordre de 2-5mm/j dans les zones de maximums de précipitation, particulièrement dans les régions côtières. À Madagascar, on note une grande différence entre les simulations du MRCC5/CanESM2 et celles du MRCC5/MPI. Cette divergence existe également dans le sud-est des régions tropicales sud. Dans ces deux régions, les erreurs sont de signes contraires; elles sont positives lorsque le MRCC5/MPI est comparé au MRCC5/ERA-Interim, et sont négatives lorsque le MRCC5/CanESM2 est comparé au MRCC5/ERA-Interim.

En JAS (Fig. 3.7), les valeurs de maximums de précipitation sont généralement plus fortes dans les simulations du MRCC5 piloté par les MCG, particulièrement dans les simulations du MRCC5/MPI. La comparaison entre MRCC5/MCG et MRCC5/ERA-Interim montre l'existence de fortes erreurs positives le long de la côte du golfe de

Guinée, et de la côte gabonaise. Par contre, la comparaison entre MRCC5/CanESM2 et MRCC5/ERA-Interim montre des erreurs négatives le long des pays du Sahel.

Les erreurs dûes aux conditions aux frontières sont plus fortes et plus étendues lorsque le MRCC5 est piloté par le MPI. Ceci s'explique par les anomalies de SST (annexe D Fig. D.1, Fig. D.2) qui sont héritées des MCG (e.g., Laprise et al. 2013). En effet, les deux modèles montrent des anomalies positives des SST plus marquées dans les régions côtières d'ouest. Ces anomalies sont plus prononcées dans le MRCC5/MPI particulièrement pour la saison JAS.

3.2.2 Humidité du sol

Les figures 3.8 et 3.9 présentent les moyennes saisonnières de l'humidité du sol à tous les niveaux du MRCC5.

En JFM (Fig. 3.8), le modèle piloté par les réanalyses indique que la zone entre l'Est de la R.D. du Congo et le Mozambique, ainsi que l'Est de Madagascar sont les zones où le sol est plus humide. Les simulations du modèle MRCC5 piloté par les deux modèles globaux reproduisent ces caractéristiques. Cependant, ces simulations montrent des valeurs assez fortes dans les régions côtières est et ouest des tropiques Sud. Dans ces régions, les deux simulations présentent alors des erreurs positives très fortes (150-200 mm environ), particulièrement, lorsque le MRCC5 est piloté par MPI. À Madagascar et dans les régions sud-est des tropiques Sud, le MRCC5/CanESM2 (MRCC5/MPI) présente des erreurs négatives (positives) lorsqu'il est comparé aux simulations du MRCC5/ERA-Interim.

En JAS (Fig. 3.9), la partie Est de la R.D. du Congo reste encore très humide. Durant cette saison, des fortes valeurs d'humidité du sol sont simulées par le MRCC5/ERA-Interim dans les régions sud de l'Afrique de l'ouest ainsi qu'à l'Est de Madagascar. Les simulations du MRCC5 piloté

par les deux modèles globaux reproduisent également ces caractéristiques, mais ils ont tendance à montrer des valeurs beaucoup plus fortes, particulièrement les simulations du MRCC5/MPI. Les deux simulations ont des valeurs très fortes sur la côte ouest dans les régions sud de l'Afrique de l'ouest et dans les régions Est et Ouest adjacentes à l'Équateur au Sud. Celles-ci se traduisent par des erreurs positives de l'ordre de 150-200 mm. Toutefois, la répartition spatiale des erreurs du MRCC5/MPI est la plus étendue. Le MRCC5/CanESM2 présente des erreurs négatives le long des pays du Sahel. Le conflit de signaux entre les deux modèles demeure encore sur la même région du sud-est des tropiques Sud, là où le MRCC5/CanESM2 montre des erreurs négatives contrairement au MRCC5/MPI.

Les erreurs positives observées en JAS et JFM dans les régions côtières pourraient résulter des erreurs de précipitations des MRCC5/MCG induites par les erreurs dans les données de SST de forçages aux frontières.

3.2.3 Ruissellement

Les figures 3.10 et 3.11 illustrent le ruissellement total à l'échelle saisonnière, simulé par le MRCC5/ERA-Interim, MRCC5/CanESM2 et MRCC5/MPI. Les simulations reproduisent presque la même répartition en JFM (Fig. 3.10). Les plus fortes valeurs sont observées dans les régions de maximums de précipitation ce qui est bien cohérent. Toutefois, elles se comportent différemment surtout à Madagascar et au sud-est des tropiques Sud. Dans ces régions, le MRCC5/CanESM2 (MRCC5/MPI) affiche des erreurs négatives (positives) lorsqu'il est comparé aux simulations du MRCC5/ERA-Interim. Dans le reste du domaine, les deux simulations ont des erreurs positives généralement plus prononcées dans les régions côtières.

De même, en JAS (Fig. 3.11), les simulations sont cohérentes entre elles en ce que concerne la distribution spatiale du ruissellement total. Les régions de fortes valeurs coïncident encore avec les zones de maximums de précipitation. Le modèle MRCC5/CanESM2 présente des erreurs négatives le long des pays du Sahel, tandis que les deux simulations présentent des erreurs positives sur les régions côtières du golfe de Guinée. Ces erreurs sont plus importantes dans les simulations du MRCC5/MPI.

3.2.4 Évaporation

Les figures 3.12 et 3.13 permettent de comparer les moyennes saisonnières de l'évaporation simulées par le MRCC5/CanESM2 et le MRCC5/MPI à celles simulées par le MRCC5/ERA-Interim.

En JFM (Fig. 3.12), les simulations du MRCC5/ERA-Interim montrent les valeurs d'évaporation les plus importantes dans l'Hémisphère sud, à l'exception de quelques régions de la côte sud-ouest. Les simulations du MRCC5 piloté par les deux modèles globaux reproduisent la même distribution de l'évaporation. Cependant, le MRCC5/CanESM2 n'a pas bien capturé les fortes valeurs dans les régions sud-est. Dans ces régions, le modèle présente alors des erreurs négatives. En outre, les deux simulations ont une ligne de fortes valeurs d'évaporation le long de la côte ouest des tropiques sud. Cette ligne n'est pas observée dans les simulations du MRCC5/ERA-Interim. Les deux simulations présentent alors des fortes erreurs positives dans cette zone.

Comparées à JFM, en JAS (Fig. 3.13) les valeurs sont moins fortes. D'importantes valeurs d'évaporation sont observées sur une bande délimitée environ par les latitudes 15° N et 10° S. Les deux simulations ont bien simulé cette zone de fortes valeurs d'évaporation. Toutefois, la bande est un peu plus large et les valeurs un peu plus fortes. Les deux

simulations ont des erreurs positives dans les régions Est et Ouest des tropique Sud. Ces erreurs sont plus fortes et plus répandues dans les simulations du MRCC5/MPI. Le MRCC5/MPI présente également des fortes erreurs positives au sud de Madagascar. Les fortes valeurs d'évaporation sont généralement localisées dans les zones de fortes précipitations et d'humidité du sol. Par conséquent, les erreurs observées sont induites par les erreurs dans les simulations des précipitations du MRCC5/MCG.

Les distributions spatiotemporelles des variables étudiées sont consistantes dans les 3 trois simulations du MRCC5. En effet, les zones de fortes précipitations coïncident généralement avec les zones de fortes valeurs de ruissellement, d'humidité du sol et d'évaporation.

3.3 Changements appréhendés

Les figure 3.14, 3.15, 3.16 et 3.17 présentent les changements appréhendés durant les deux périodes 2040-2070 et 2071-2100, notées F1 et F2 respectivement, dont la période de contrôle est de 1981-2010, selon le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP4.5. Dans les figures on montre seulement les résultats qui sont statistiquement significatifs à une valeur de confiance de 95%.

3.3.1 Changements projetés pendant l'été austral (JFM)

En JFM, le MRCC5/CanESM2 (Fig. 3.14) projette une diminution des précipitations, du ruissellement total et de l'humidité du sol dans la région de la R.D du Congo, cette diminution est plus forte pendant la période F2. Dans cette région, le modèle prévoit une faible diminution (augmentation) de l'évaporation au Nord (Sud) respectivement. Les résultats sont cohérents car une diminution de précipitation doit

correspondre à une diminution d'humidité du sol et, par suite, à une diminution de ruissellement total. Dans le Sud de la R.D. du Congo et à Madagascar, le MRCC5/MPI (Fig. 3.15) est en accord avec le MRCC5/CanESM2 sur les changements prévus de l'évaporation. Par contre, le MRCC5/MPI ne prévoit presque pas de changements significatifs pour la précipitation, l'humidité du sol, et le ruissellement total dans ces régions.

3.3.2 Changements projetés pendant l'été boréal (JAS)

En JAS, Le MRCC5/CanESM2 (Fig. 3.16) prévoit une augmentation des précipitations dans le sud ouest de l'Éthiopie et dans certaines régions sud de l'Afrique de l'ouest notamment Libéria, Côte d'Ivoire et Nigéria. Cette augmentation devient plus intense pendant la deuxième période future.

Dans ces régions, le modèle prédit également une augmentation de ruissellement total. Cependant, le MRCC5/CanESM2 montre une diminution des précipitations ainsi que du ruissellement total dans les régions centrales du domaine d'étude encerclées en rouge et dans le nord de l'Éthiopie. Dans ces régions, une diminution de l'humidité du sol est également notée; tandis que l'évaporation connaîtra une faible augmentation au nord de la région encerclée, et une diminution au sud de cette région et au nord de l'Éthiopie qui est probablement due à l'augmentation de la température dans ces régions.

En général, les changements appréhendés des différentes variables par MRCC5/CanESM2 sont consistents; en effet, une diminution de précipitation implique une diminution d'humidité du sol et par suite une diminution du ruissellement total. En plus, dans le sud-ouest de l'Éthiopie, là où il y'a une augmentation de précipitation et de ruissellement total, aucun changement significatif d'humidité du sol n'est décelé. En effet,

l'analyse du nombre de jours de précipitations extrêmes montre une augmentation des événements extrêmes sur la même région. Ceci favoriserait plus de ruissellement à la surface et moins d'infiltration.

Quand aux changements appréhendés produits par les simulations du MRCC5/MPI (Fig. 3.17), les précipitations et le ruissellement connaîtront une augmentation dans les mêmes régions d'augmentation de ces variables projetées par le MRCC5/CanESM2, en plus du centre de l'Afrique (région encerclée en rouge). Pourtant, le modèle projette une diminution de ces deux variables sur le Sahel.

Pour cette dernière région le modèle prévoit également une diminution d'humidité du sol et d'évaporation. Le MRCC5/MPI prédit, cependant, une faible augmentation d'évaporation dans les régions sud de l'Afrique de l'Ouest et le centre de l'Afrique.

Les deux simulations sont généralement en accord sur la forte augmentation ou diminution des différentes variables hydriques étudiées, à l'exception de quelques régions où les signaux sont contradictoires. Le MRCC5/MPI prévoit une diminution des différentes variables étudiées sur le Sahel, tandis que le MRCC5/CanESM2 montre une légère augmentation ou presque pas de changements significatifs de ces variables. Ce conflit de signaux est également observé dans le centre de l'Afrique (région encerclée en rouge). Dans cette région, le MRCC5/CanESM2 prévoit généralement une diminution des valeurs moyennes saisonnières des quatre variables, tandis que le MRCC5/MPI montre une augmentation, sauf pour l'évaporation où les modèles semblent bien concorder dans la moitié nord de la région. En effet, contrairement au MRCC5/CanESM2, le MRCC5/MPI prévoit une augmentation de précipitation et du ruissellement, par contre, aucun changement significatif de l'humidité du sol est prévu. Ceci peut être expliqué par l'augmentation prévue du nombre de jours de précipitations extrêmes dans ces régions, conduisant ainsi à plus de ruissellement de surface et moins d'infiltration dans le sol.

Les changements prévus, qu'ils soient une augmentation ou une diminution des variables étudiées, sont plus intenses durant la période F2. Ces changements sont généralement de signes contraires dans les deux simulations du MRCC5, dans la majeure partie du domaine. Cependant, les deux simulations semblent être en accord sur la cause de l'augmentation des précipitations qui serait associée à l'augmentation du nombre de jours de précipitations extrêmes, favorisant une augmentation de ruissellement à la surface et une diminution de l'infiltration. Par conséquent, les changements de l'humidité du sol dépendraient des caractéristiques (e.g., température, type de sol, végétation, etc.) de la région.

Afin de comprendre la différence entre les deux simulations (MRCC5/CanESM2 et MRCC5/MPI) dans la grande région du Congo (région encerclée en rouge; Fig. 3.16, Fig. 3.17), nous avons étudié, sur cette région, l'évolution temporelle des moyennes saisonnières annuelles pour JAS, de 1990 à 2090, de la précipitation (Fig. 3.18), du ruissellement (Fig. 3.19), de l'humidité du sol (Fig. 3.20), de l'évaporation (Fig. 3.21), de la température de l'air à 2 m (Fig. 3.22) et du nombre de jours de précipitation extrêmes (Fig. 3.23). L'analyse de ces figures nous donne une bonne indication sur les causes de cette différence.

MRCC5/MPI simule en moyenne des précipitations dans la région sélectionnée plus élevées d'environ de 0.8 mm/j par rapport à la moyenne de la simulation de MRCC5/CanESM2 (Fig. 3.18). L'évolution temporelle de la précipitation simulée par les deux modèles est représentée par les deux courbes qui ont un comportement opposé à l'exception de la fin du XXI^e siècle. Les précipitations simulées par MRCC5/MPI ont tendance à augmenter. En effet, pendant la période de contrôle, MRCC5/MPI simule des précipitations moins élevées par rapport à celles simulées pendant les deux périodes futures. Cependant, les précipitations simulées par

MRCC5/CanESM2 subiront une légère diminution par rapport à celles simulées durant la période de contrôle.

L'évolution temporelle du ruissellement (Fig. 3.19) et de l'humidité du sol (Fig. 3.20) est consistante avec celle de la précipitation (Fig. 3.18). En effet, les périodes d'augmentation de la précipitation correspondent vraisemblablement à une augmentation du ruissellement et de l'humidité du sol, et vice versa. Ceci est cohérent avec l'évolution du cycle hydrologique. Le MRCC5/MPI simule un taux de précipitation, de ruissellement et de l'humidité du sol plus élevé que le MRCC5/CanESM2. Cependant, ce dernier simule un taux d'évaporation (Fig. 3.21) plus élevé que celui simulé par le MRCC5/MPI. Cette différence résulte probablement de l'évolution de la température de l'air (Fig. 3.22). En effet, le MRCC5/CanESM2 est plus chaud que le MRCC5/MPI.

L'analyse des différentes variables montre que, en termes quantitatifs, les écarts entre les deux modèles sont généralement faibles, conséquence du fait que les valeurs sont moyennées sur la région considérée où la contribution des faibles valeurs est probablement plus importante.

CONCLUSION

Dans cette étude nous avons étudié les changements appréhendés dans la région de l'Afrique après avoir évalué les erreurs de performance du MRCC5 en comparant les simulations du modèle piloté par les réanalyses ERA-interim avec les observations disponibles et les erreurs dues aux conditions aux frontières en comparant les simulations du MRCC5 piloté par les deux MCG (CanESM2 et MPI) avec celles du MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-interim.

Pour les projections futures, nous avons considéré deux périodes futures de 30 ans chacune (F1 : 2041-2070, F2 : 2071-2100), la période de contrôle étant de 1981 à 2010. Les changements appréhendés sont déterminés en comparant les moyennes saisonnières des quatre variables hydriques simulées par le MRCC5/CanESM2 et par le MRCC5/MPI selon le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP4.5, pendant les deux périodes futures F1 et F2, avec celles simulées par le même modèle pendant la période de contrôle C. Seuls les résultats qui sont statistiquement significatifs à une valeur de confiance de 95% sont présentés.

En JAS le MRCC5 surestime généralement les précipitations par rapport aux observations CRU, dans les zones où se produisent les maximums de précipitations (e.g. Madagascar, Éthiopie, les hauts plateaux de Guinée). Toutefois, le MRCC5 a réussi à bien reproduire la répartition moyenne des précipitations et en particulier la mousson ouest africaine (MOA), mais il n'arrive pas à simuler les précipitations assez loin au nord dans le Sahel. Le modèle surestime systématiquement le ruissellement lorsqu'il est comparé aux analyses GLDAS. Une surestimation est également notée dans plusieurs régions lorsque les simulations sont comparées aux analyses GRDC. En JFM, le modèle a tendance à sous-estimer le ruissellement lorsque sa performance est évaluée par les analyses GRDC.

En revanche, la comparaison des simulations du modèle avec les analyses GLDAS montre plutôt une tendance à la surestimation. Le modèle surestime le ruissellement total de façon excessive à Madagascar lorsqu'il est comparé avec les deux assimilations GRDC et GLDAS.

Le modèle n'a pas bien capturé les valeurs maximales d'humidité du sol dans les régions tropicales du sud. Au cours de l'été boréal (JAS), les simulations du modèle semblent plus réalistes. Toutefois, la bande d'humidité est plus étroite dans les simulations du MRCC5 que dans GLDAS. Cependant, le modèle semble légèrement surestimer les valeurs maximales dans certaines régions sur la ZCIT, au Mozambique et à l'est de Madagascar.

Les erreurs dues aux conditions aux frontières du MRCC5 sont plus importantes dans les zones de maximum de précipitations, particulièrement dans les régions côtières. Toutefois, les deux simulations du MRCC5 (MRCC5/CanESM2 et MRCC5/MPI) donnent des résultats différents à Madagascar et au sud-est des régions tropicales sud durant la saison JFM. Les erreurs sont positives (négatives) lorsque le MRCC5/MPI (MRCC5/CanESM2) est comparé au MRCC5/ERA-Interim. Durant l'été boréal (JAS) la comparaison du MRCC5/CanESM2 au MRCC5/ERA-Interim montre des erreurs négatives le long du Sahel, et ceci est généralement noté pour toutes les variables étudiées. Cependant, les erreurs positives sont plus fréquentes lorsque les simulations du MRCC5/MPI sont comparées à celles du MRCC5/ERA-Interim pour toutes les saisons et les variables.

Pour l'été austral, le MRCC5/CanESM2 prévoit une diminution des précipitations, de l'humidité du sol et du ruissellement total dans la région de la République Démocratique du Congo, cette diminution est plus forte pendant la période F2. Par contre, le MRCC5/PMI ne prévoit presque pas de changements significatifs pour ces variables. Cependant, dans le Sud de la R.D. du Congo et à Madagascar, le MRCC5/MPI est en accord avec le MRCC5/CanESM2 sur les changements prévus pour l'évaporation, qui

se caractérise par une faible augmentation. Une augmentation des précipitations et du ruissellement est prévue par les deux modèles en JAS dans le sud de l'Afrique de l'Ouest et le sud de l'Éthiopie, particulièrement plus intense pendant la deuxième période future. Cette augmentation n'est accompagnée d'aucun changement d'humidité du sol. Le MRCC5/MPI prévoit une diminution des variables étudiées sur le Sahel, tandis que le MRCC5/CanESM2 montre une légère augmentation ou presque pas de changements significatifs. Ce conflit de signaux est également observé dans le centre de l'Afrique (région encadrée en rouge). Dans cette région, le MRCC5/CanESM2 prévoit généralement une diminution des valeurs moyennes saisonnières des quatre variables, tandis que le MRCC5/MPI montre une augmentation, sauf pour l'évaporation où les modèles s'accordent dans la moitié nord de la région.

Dans cette étude on a utilisé un seul modèle et un seul scénario d'émission de gaz à effet de serre. Cependant, pour avoir une meilleure estimation des erreurs et des études des changements appréhendés plus robustes, plusieurs modèles à haute résolution et plusieurs scénarios pourraient être considérés. La disponibilité d'observations à hautes résolutions pour la validation des simulations demeure impérativement nécessaire.

FIGURES

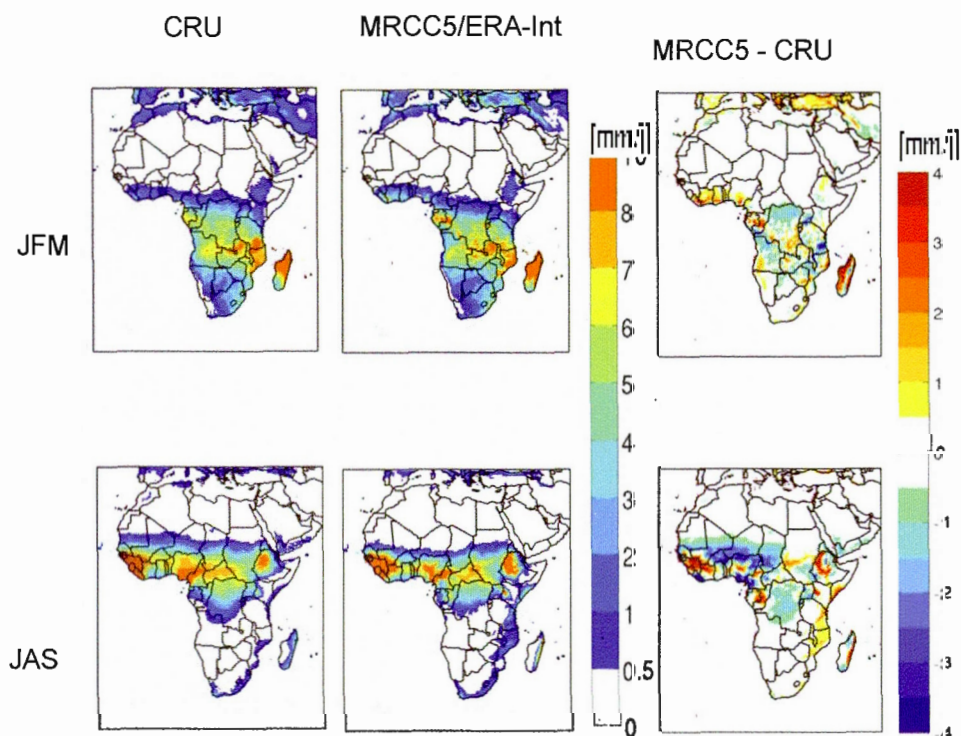


Fig. 3.1 Moyenne saisonnière des précipitations durant l'été austral (JFM) (1^e ligne) et l'été boréal (JAS) (2^e ligne) pendant la période 1984-2008, à partir des données CRU (à gauche), de la simulation du MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-Intérim (au milieu), et la différence entre MRCC5/ERA-Interim et CRU (à droite)

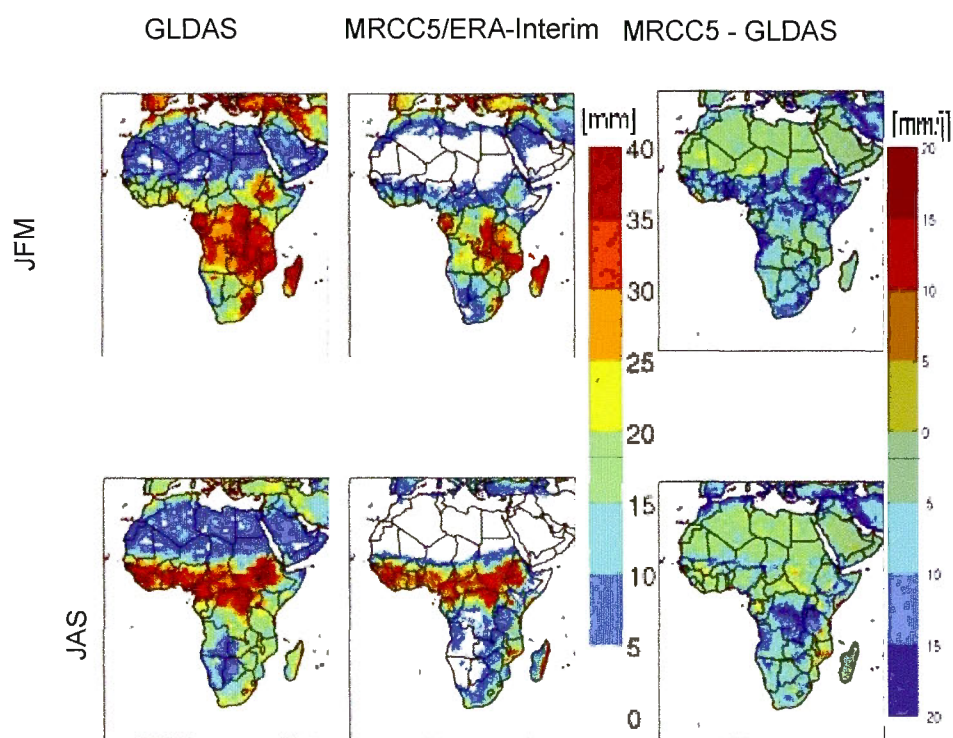


Fig. 3.2 Moyenne saisonnière de l'humidité du sol au premier niveau (0-10 cm) durant l'été austral (JFM) (1^e ligne) et l'été boréal (JAS) (2^e ligne) pendant la période 1984-2008, à partir des données GLDAS (à gauche), de la simulation du MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-Intérim (au milieu), et la différence entre MRCC5/ERA-Interim et GLDAS (à droite)

JFM

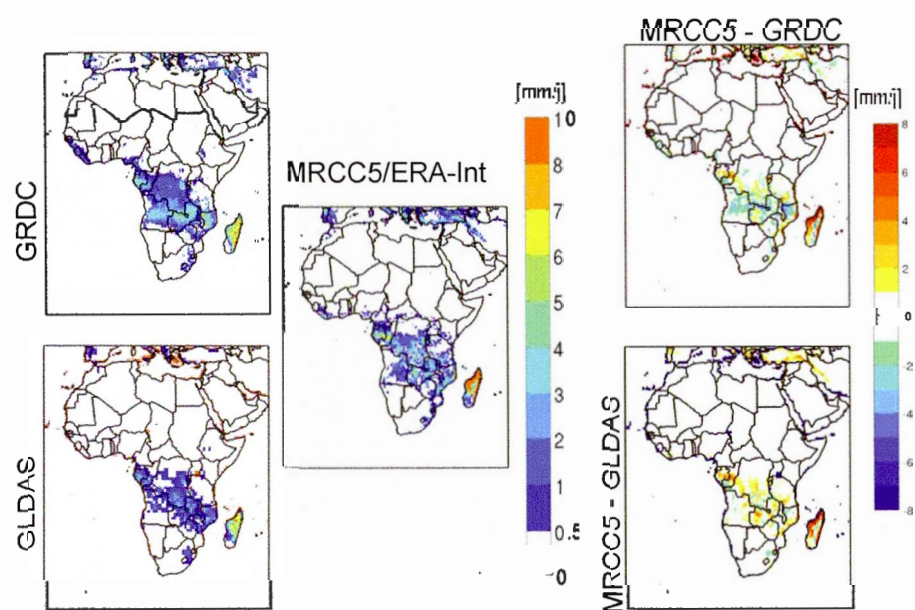


Fig. 3.3 Moyenne saisonnière de ruissellement total durant l'été austral (JFM), pendant la période 1984-2008, à partir des données GRDC (en haut à gauche), des données GLDAS (en bas à gauche), de la simulation du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/ERA-Intérim – GRDC) et (MRCC5/ERA-Intérim – GLDAS) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)

JAS

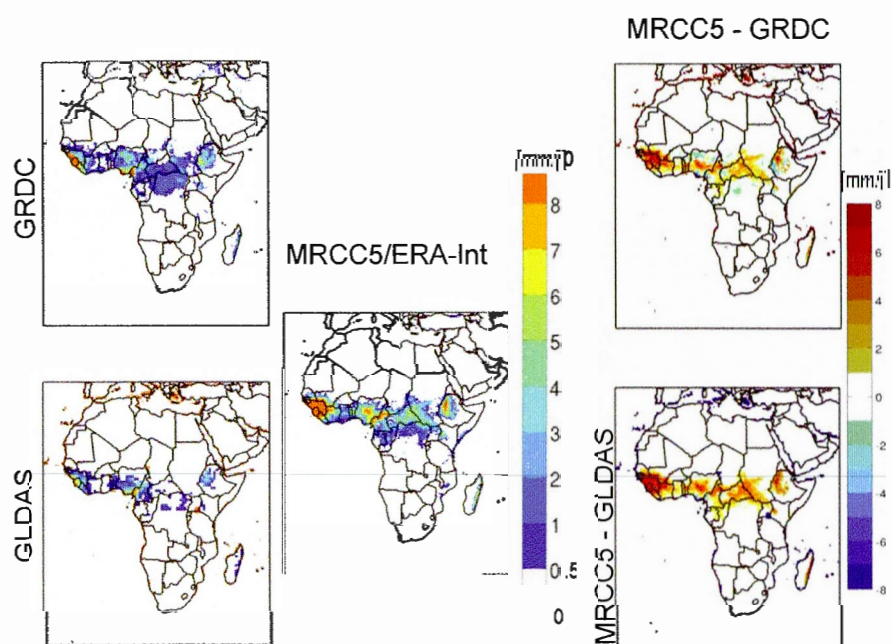


Fig. 3.4 Moyenne saisonnière de ruissellement total durant l'été boréal (JAS), pendant la période 1984-2008, à partir des données GRDC (en haut à gauche), des données GLDAS (en bas à gauche), de la simulation du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/ERA-Intérim - GRDC) et (MRCC5/ERA-Intérim - GLDAS) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)

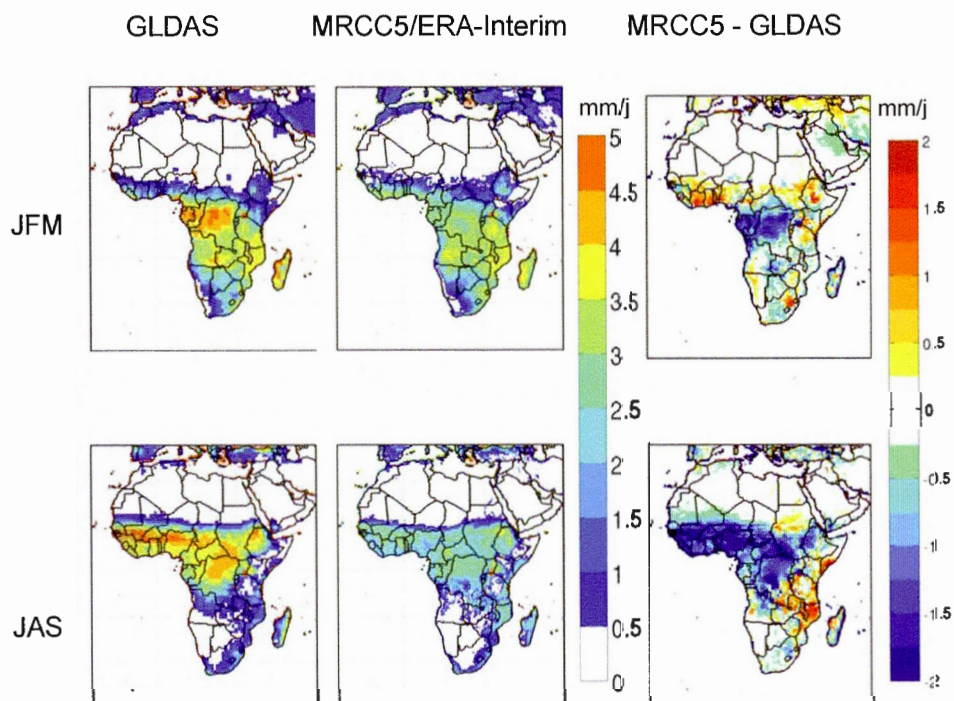


Fig. 3.5 Moyenne saisonnière de l'évaporation durant l'été austral (JFM) (1^e ligne) et l'été boréal (JAS) (2^e ligne) pendant la période 1984-2008, à partir des données GLDAS (à gauche), de la simulation du MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-Interim (au milieu), et la différence entre MRCC5/ERA-Interim et GLDAS (à droite)

JFM

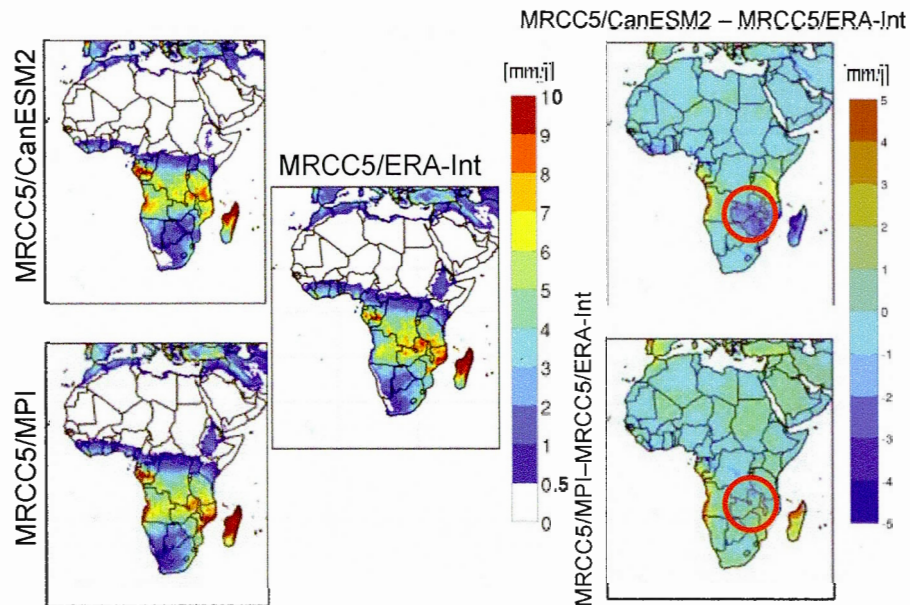


Fig. 3.6 Moyenne saisonnière de précipitation durant l'été austral (JFM), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)

JAS

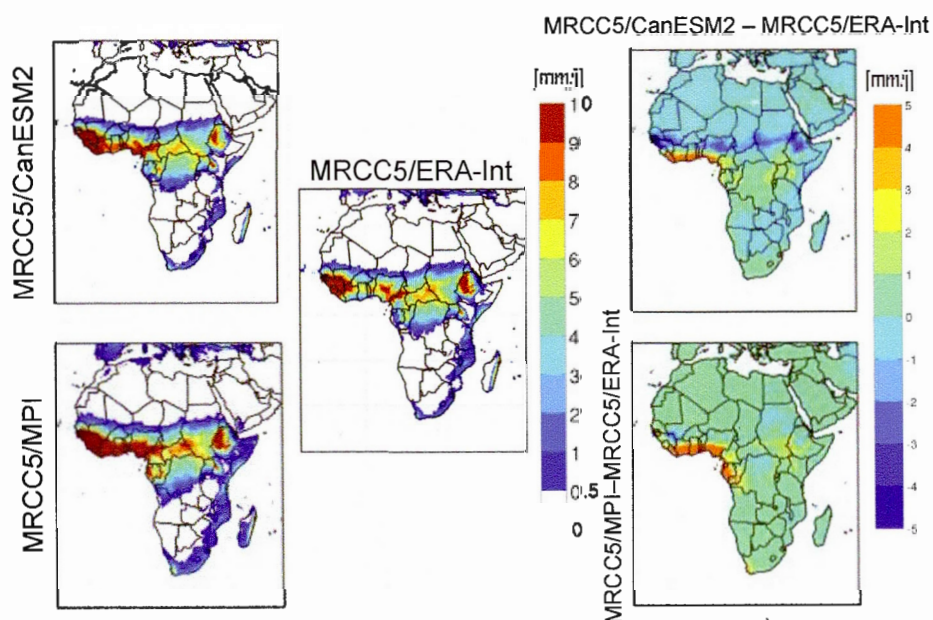


Fig. 3.7 Moyenne saisonnière de précipitation durant l'été boréal (JAS), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)

JFM

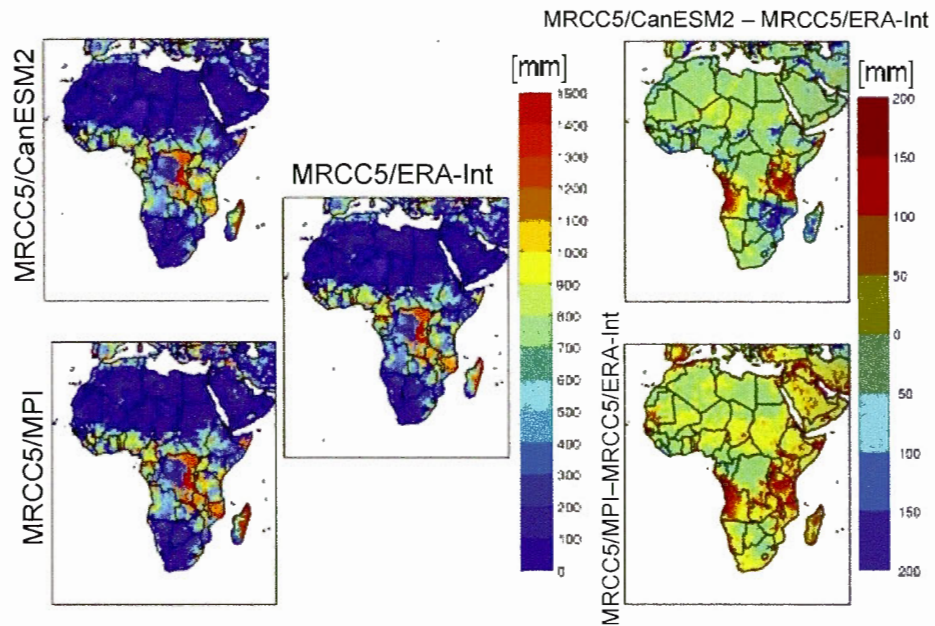


Fig. 3.8 Moyenne saisonnière de l'humidité du sol à tous les niveaux durant l'été austral (JFM), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)

JAS

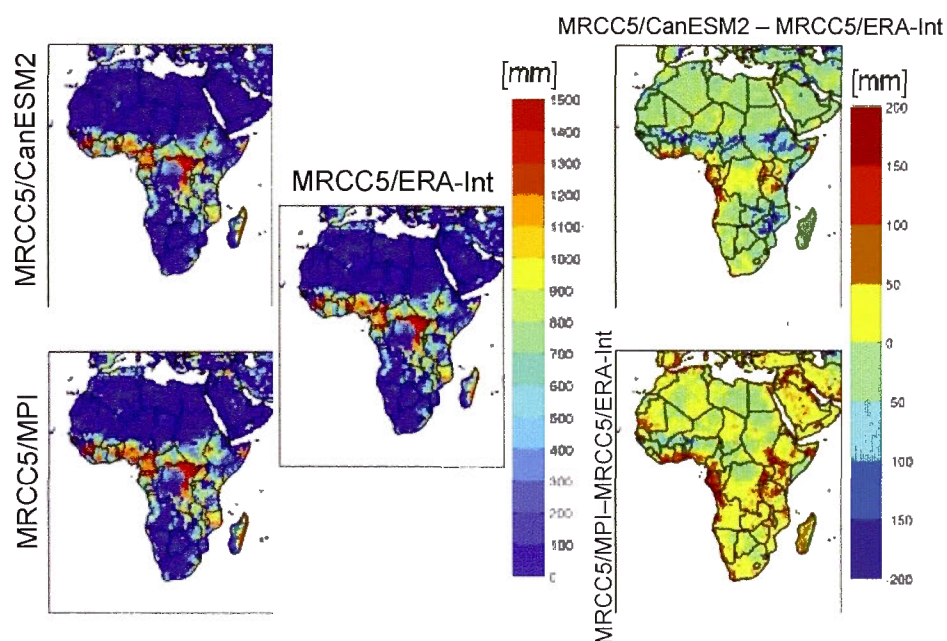


Fig. 3.9 Moyenne saisonnière de l'humidité du sol à tous les niveaux durant l'été boréal (JAS), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)

JFM

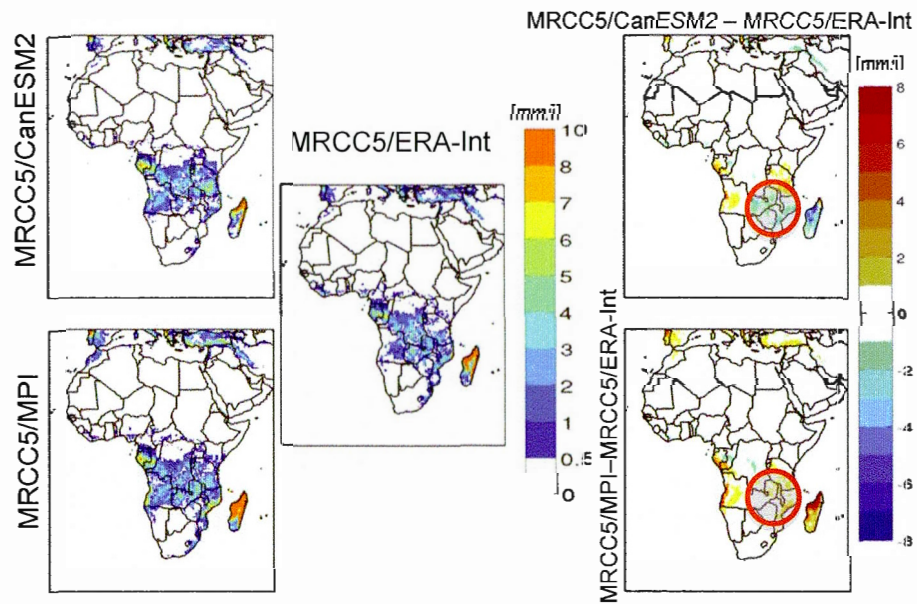


Fig. 3.10 Moyenne saisonnière de ruissellement total durant l'été austral (JFM), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)

JAS

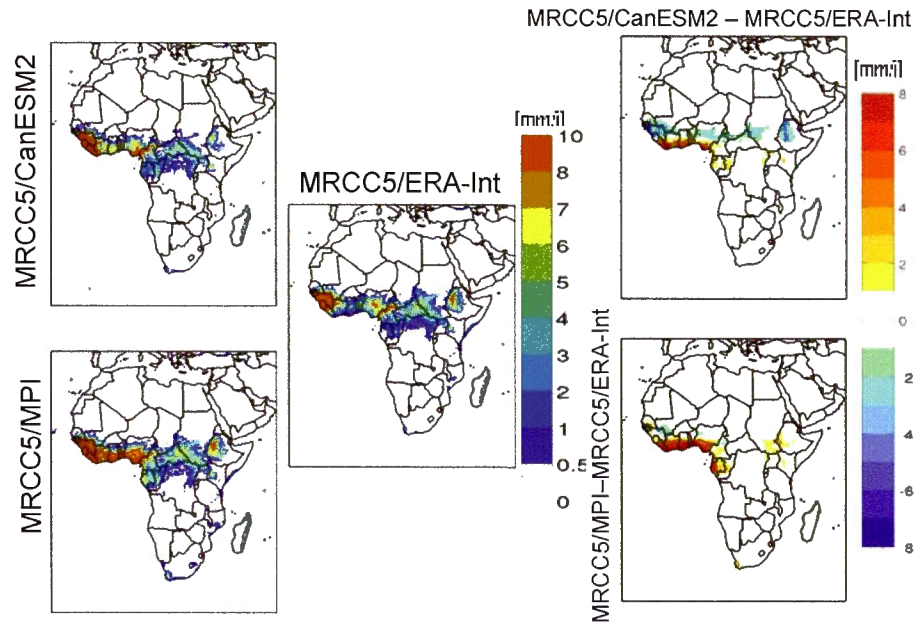


Fig. 3.11 Moyenne saisonnière de ruissellement total durant l'été boréal (JAS), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)

JFM

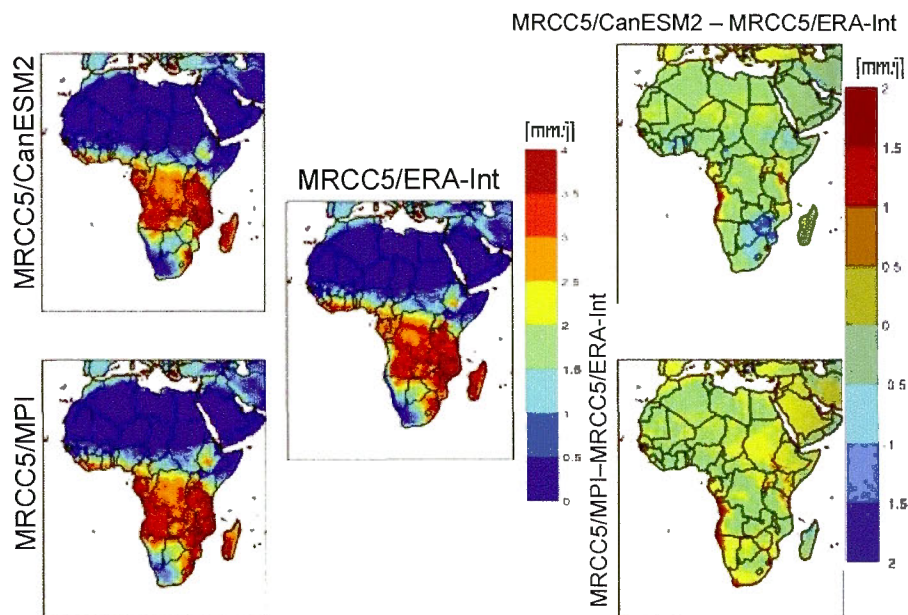


Fig. 3.12 Moyenne saisonnière de l'évaporation durant l'été austral (JFM), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)

JAS

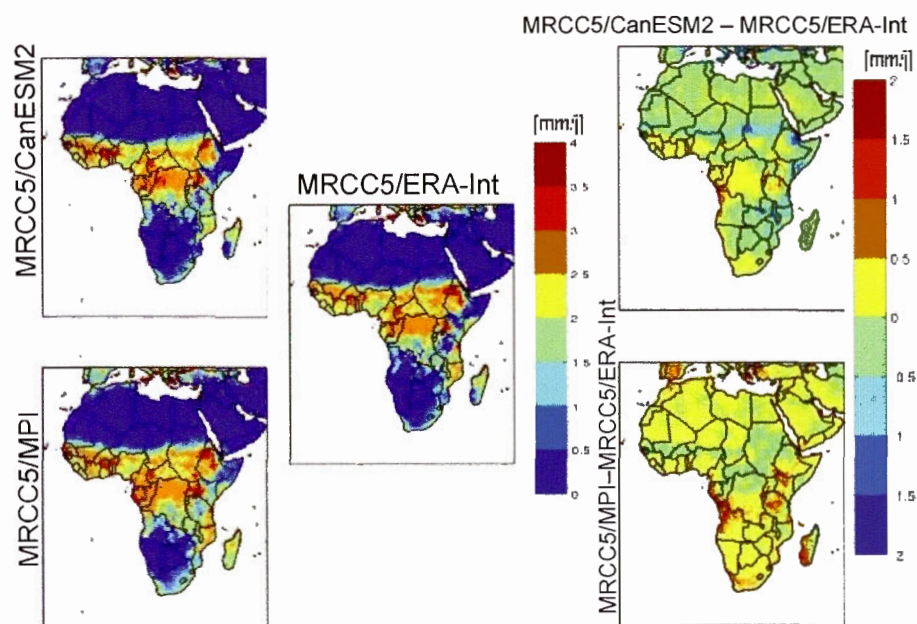


Fig. 3.13 Moyenne saisonnière de l'évaporation durant l'été boréal (JAS), pendant la période 1984-2008, à partir des simulations de MRCC5/CanESM2 (en haut à gauche), de MRCC5/MPI (en bas à gauche), du MRCC5/ERA-Intérim (au milieu), et les différences (MRCC5/CanESM2 - MRCC5/ERA-Intérim) et (MRCC5/MPI - MRCC5/ERA-Intérim) respectivement (en haut à droite) et (en bas à droite)

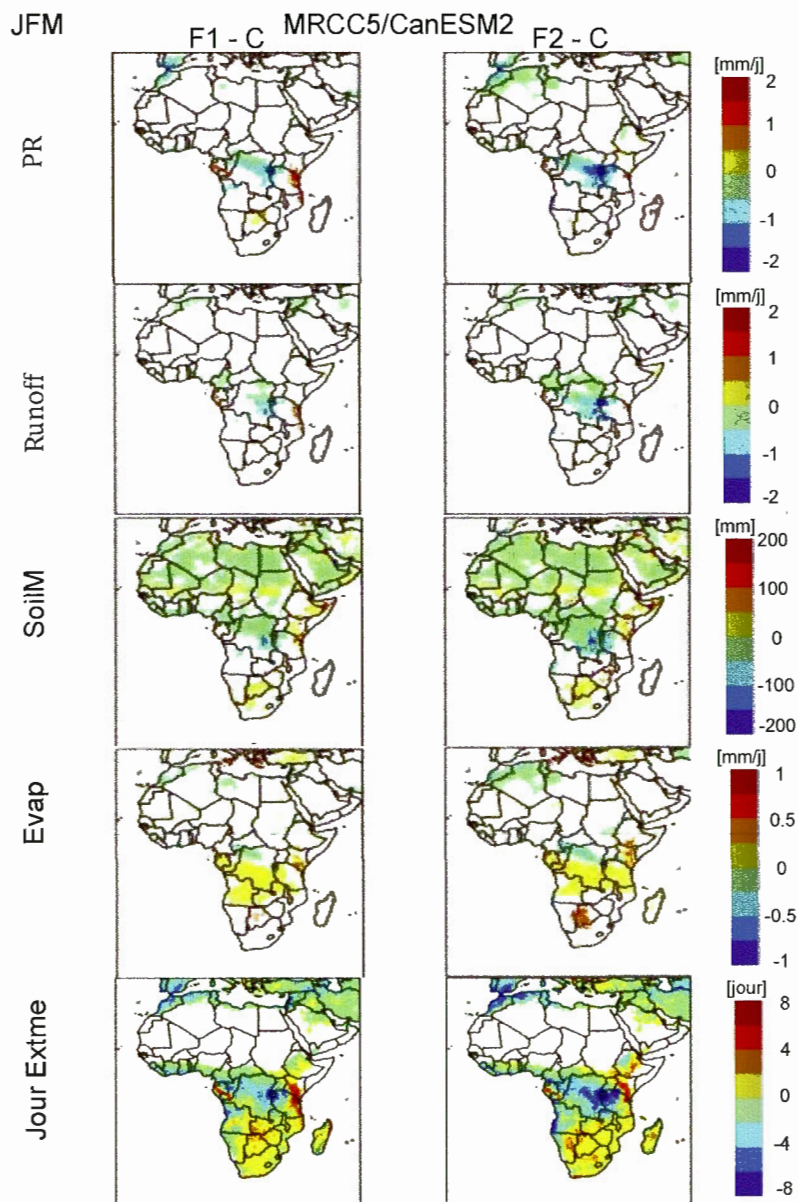


Fig. 3.14 Changements appréhendés des précipitations (ligne 1), du ruissellement total (ligne 2), de l'humidité du sol (ligne 3), de l'évaporation (ligne 4) et du nombre de jours de précipitations extrêmes (ligne 5); simulés par MRCC5/CanESM2; pendant les périodes moyennées en été austral JFM : (2041-2070)-(1981-2010) (colonne 1) et (2071-2100)-(1981-2010) (colonne 2). Les points de la grille où les changements prévus ne sont pas statistiquement significatifs à une valeur de confiance de 95% sont présentés avec la couleur blanche

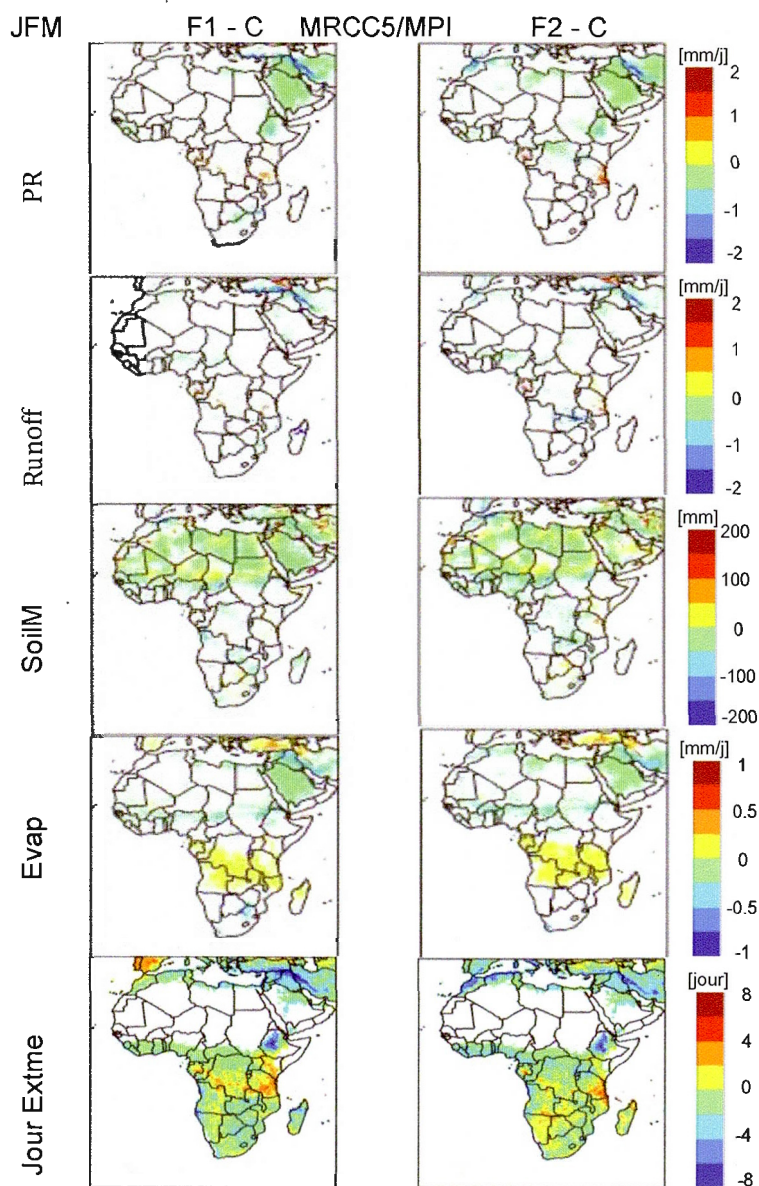


Fig. 3.15 Changements appréhendés des précipitations (ligne 1), du ruissellement total (ligne 2), de l'humidité du sol (ligne 3), de l'évaporation (ligne 4) et du nombre de jours de précipitations extrêmes (ligne 5); simulés par MRCC5/MPI; pendant les périodes moyennées en été austral JFM : (2041-2070)-(1981-2010) (colonne 1) et (2071-2100)-(1981-2010) (colonne 2). Les points de la grille où les changements prévus ne sont pas statistiquement significatifs à une valeur de confiance de 95% sont présentés avec la couleur blanche

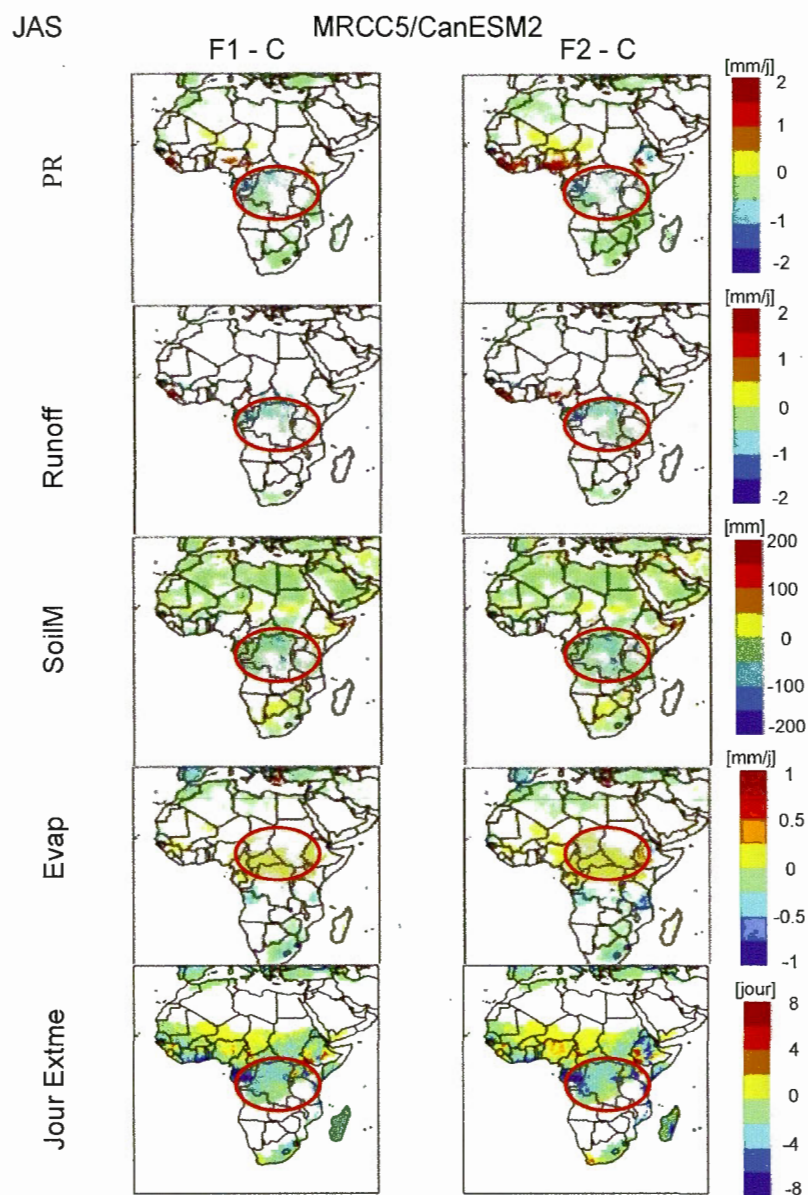


Fig. 3.16 Changements appréhendés des précipitations (ligne 1), du ruissellement total (ligne 2), de l'humidité du sol (ligne 3), de l'évaporation (ligne 4) et du nombre de jours de précipitations extrêmes (ligne 5); simulés par MRCC5/CanESM2; pendant les périodes moyennées en été austral JAS : (2041-2070)-(1981-2010) (colonne 1) et (2071-2100)-(1981-2010) (colonne 2). Les points de la grille où les changements prévus ne sont pas statistiquement significatifs à une valeur de confiance de 95% sont présentés avec la couleur blanche. Les cercles rouges représentent la région de signaux contradictoires entre les deux simulations (MRCC5/CanESM2 et MRCC5/MPI)

JAS

MRCC5/MPI

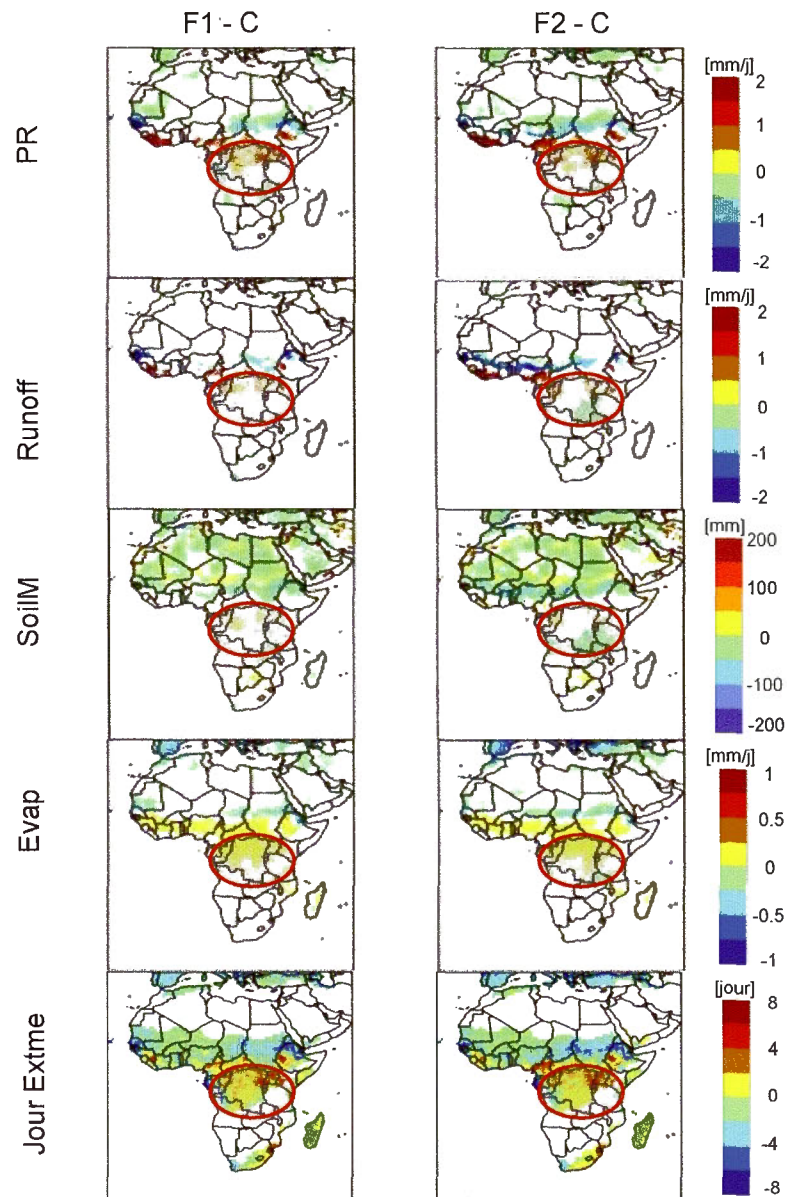


Fig. 3.17 Changements appréhendés des précipitations (ligne 1), du ruissellement total (ligne 2), de l'humidité du sol (ligne 3), de l'évaporation (ligne 4) et du nombre de jours de précipitations extrêmes (ligne 5); simulés par MRCC5/MPI; pendant les périodes moyennées en été austral JAS : (2041-2070)-(1981-2010) (colonne 1) et (2071-2100)-(1981-2010) (colonne 2). Les points de la grille où les changements prévus ne sont pas statistiquement significatifs à une valeur de confiance de 95% sont présentés avec la couleur blanche. Les cercles rouges représentent la région de signaux contradictoires entre les deux simulations (MRCC5/CanESM2 et MRCC5/MPI)

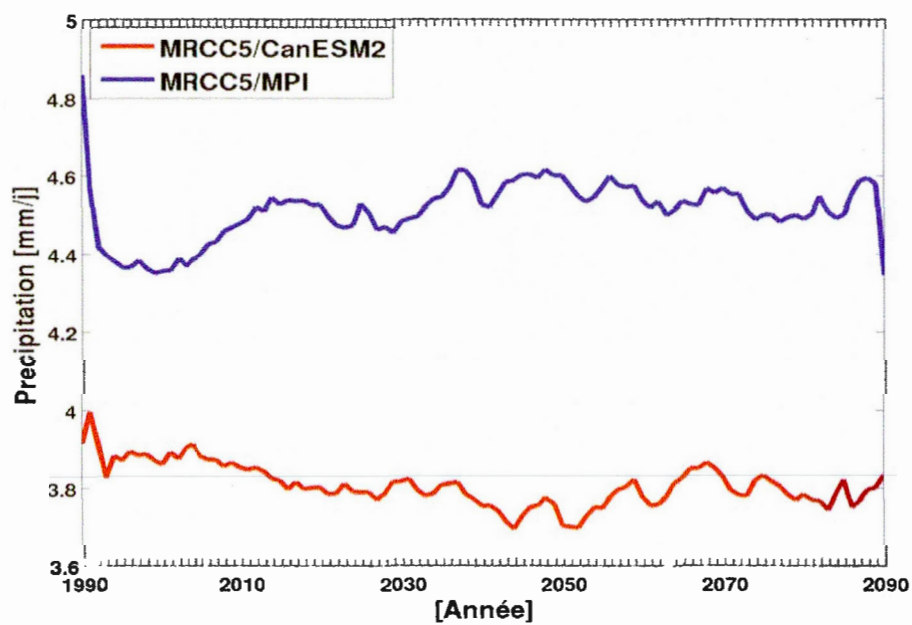


Fig. 3.18 Évolution temporelle de précipitation de 1990 à 2090 dans la région encadrée en rouge, simulé par MRCC5/CanESM2 (en rouge) et par MRCC5/MPI (en bleu)

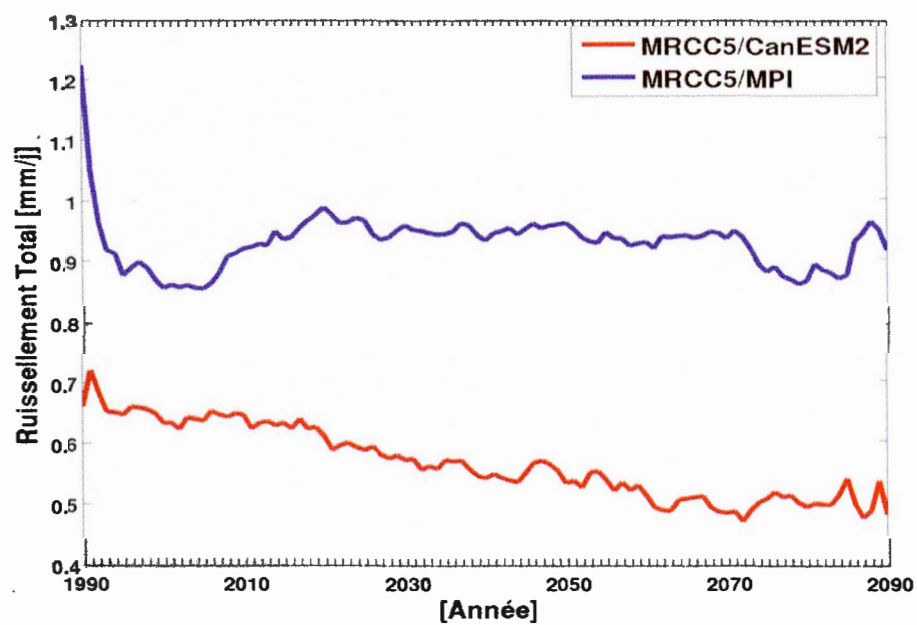


Fig. 3.19 Évolution temporelle de ruissellement total de 1990 à 2090 dans la région encadrée en rouge, simulé par MRCC5/CanESM2 (en rouge) et par MRCC5/MPI (en bleu)

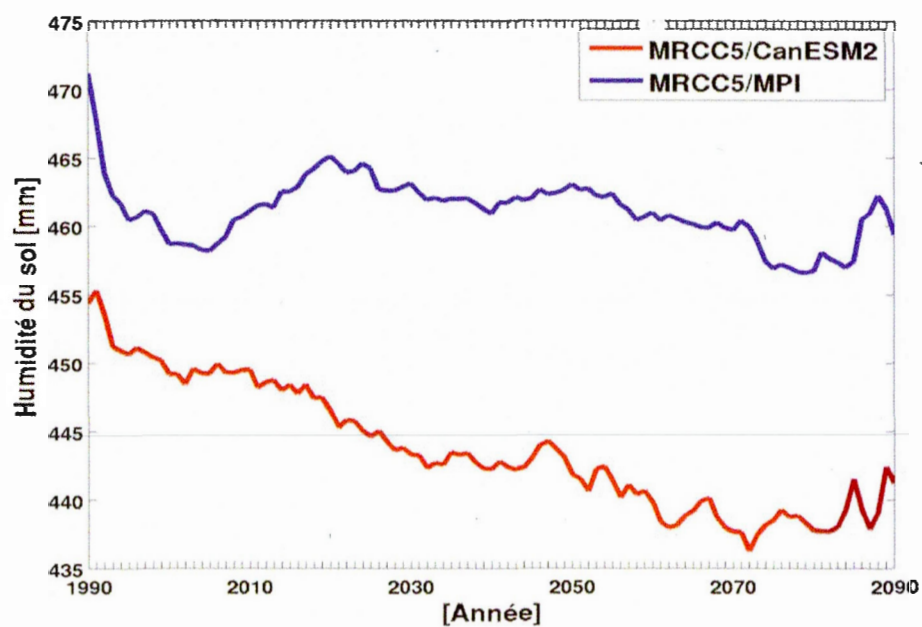


Fig. 3.20 Évolution temporelle de l'humidité du sol de 1990 à 2090 dans la région encadrée en rouge, simulé par MRCC5/CanESM2 (en rouge) et par MRCC5/MPI (en bleu)

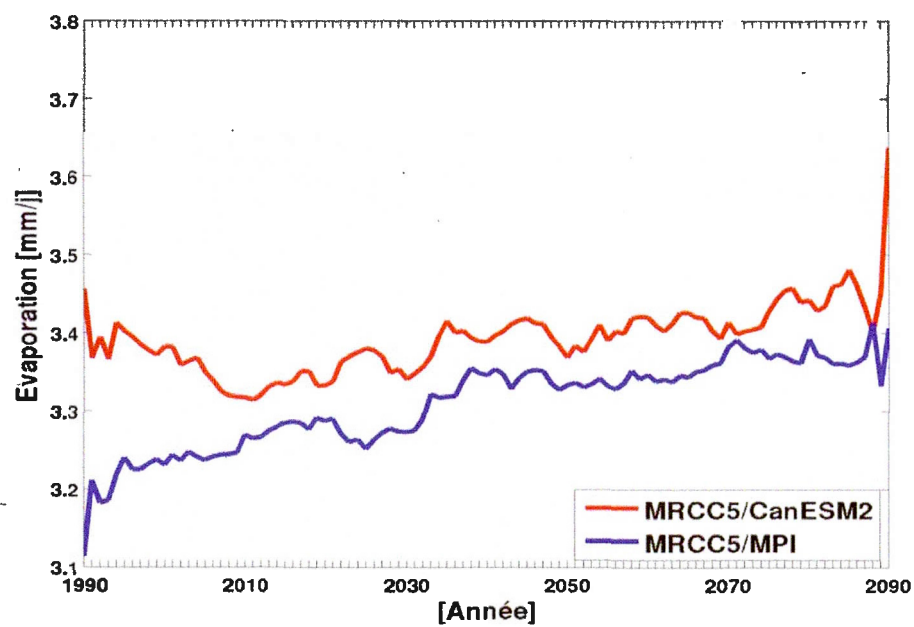


Fig. 3.21 Évolution temporelle de l'évaporation de 1990 à 2090 dans la région encadrée en rouge, simulé par MRCC5/CanESM2 (en rouge) et par MRCC5/MPI (en bleu)

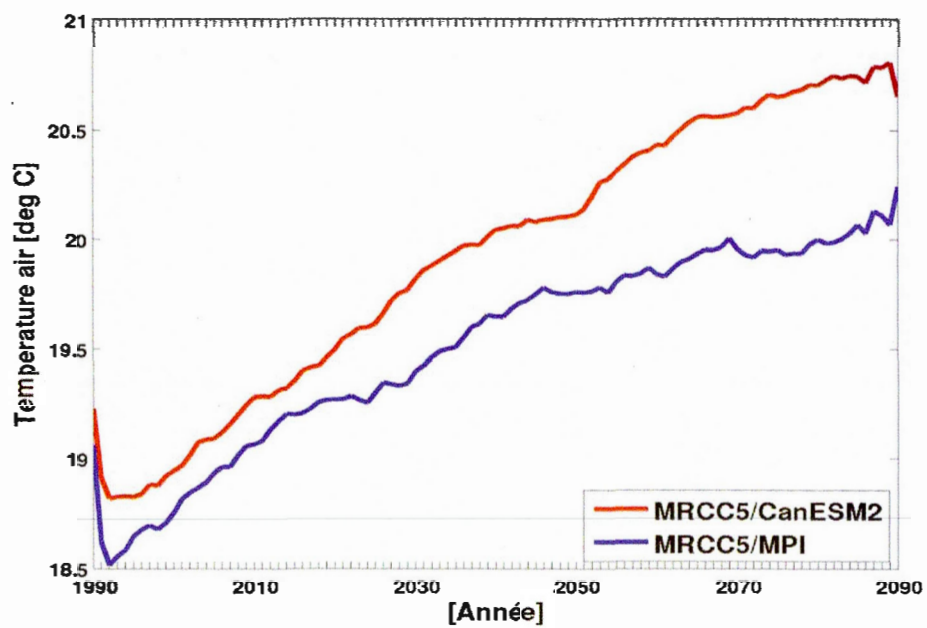


Fig. 3.22 Évolution temporelle de la température de l'air de 1990 à 2090 dans la région encadrée en rouge, simulé par MRCC5/CanESM2 (en rouge) et par MRCC5/MPI (en bleu)

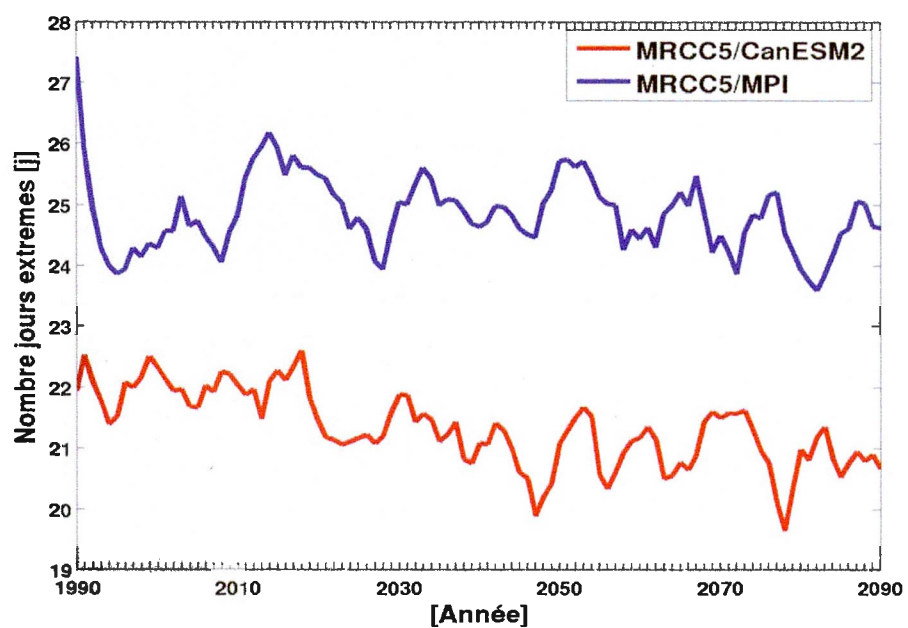


Fig. 3.23 Évolution temporelle du nombre de jours de précipitations extrêmes de 1990 à 2090 dans la région encadrée en rouge, simulé par MRCC5/CanESM2 (en rouge) et par MRCC5/MPI (en bleu)

ANNEXES

ANNEXE A

Carte de l'Afrique avec les coordonnées latitudinales et longitudinales

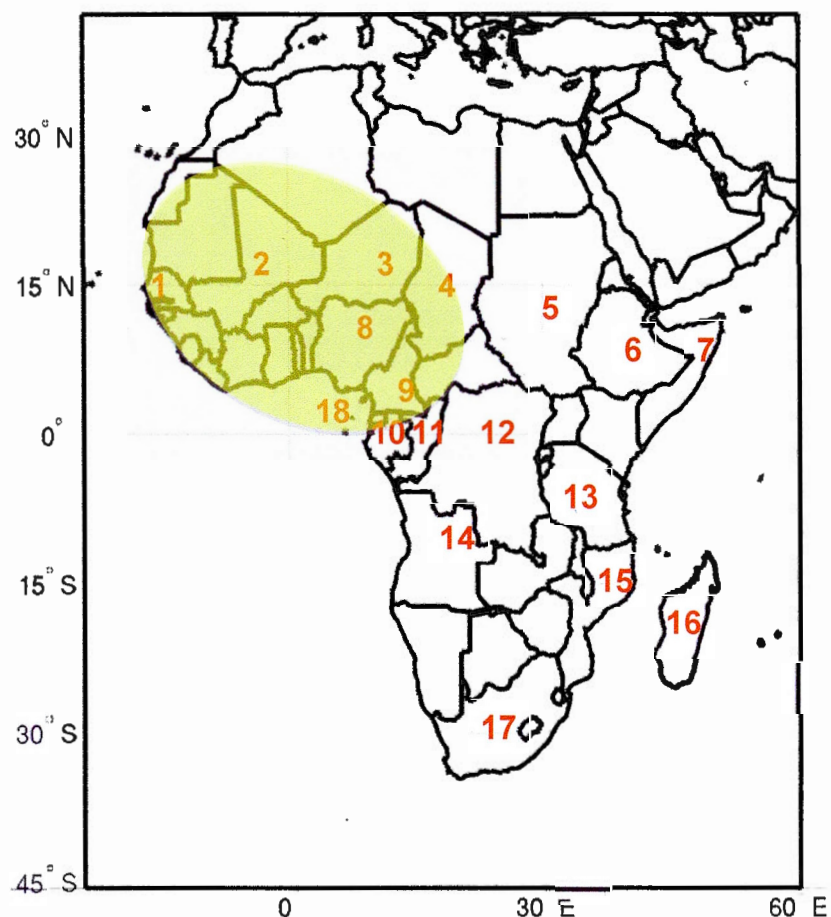


Fig. A.1 Carte de l'Afrique avec les coordonnées latitudinales et longitudinales. La partie hachurée en jaune représente l'Afrique de l'Ouest. Les numéros montrés sur la carte identifient les pays suivants : 1-Sénégal, 2-Mali, 3-Niger, 4-Tchad, 5-Soudan, 6-Ethiopie, 7-Somalie, 8-Nigeria, 9-Cameroun, 10-Gabon, 11-Congo, 12-R. D. du Congo, 13-Tanzanie, 14-Angola, 15-Mozambique, 16-Madagascar, 17-Afrique du sud, 18-Golfe de Guinée

ANNEXE B

Données géophysiques de L'Afrique

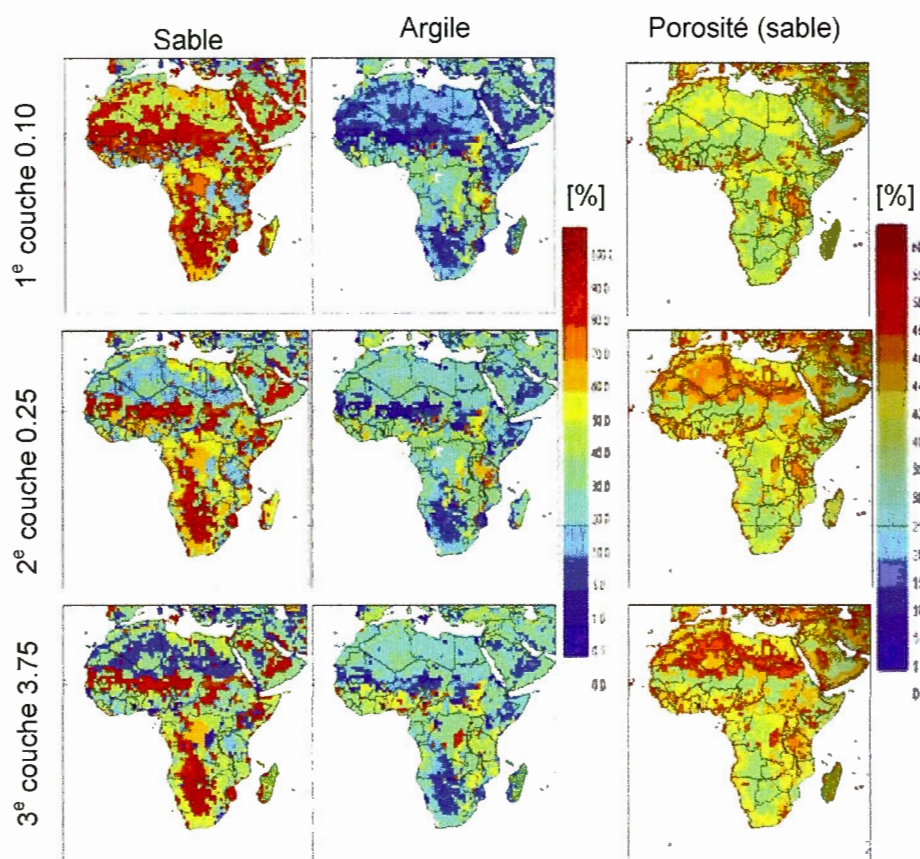


Fig.B.1 Fractions en [%] du sable, d'argile et de la porosité du sable dans les trois premières Couches (0.10 cm, 0.25 cm et 3.75 cm) du domaine d'étude (Afrique) utilisé par MRCC5

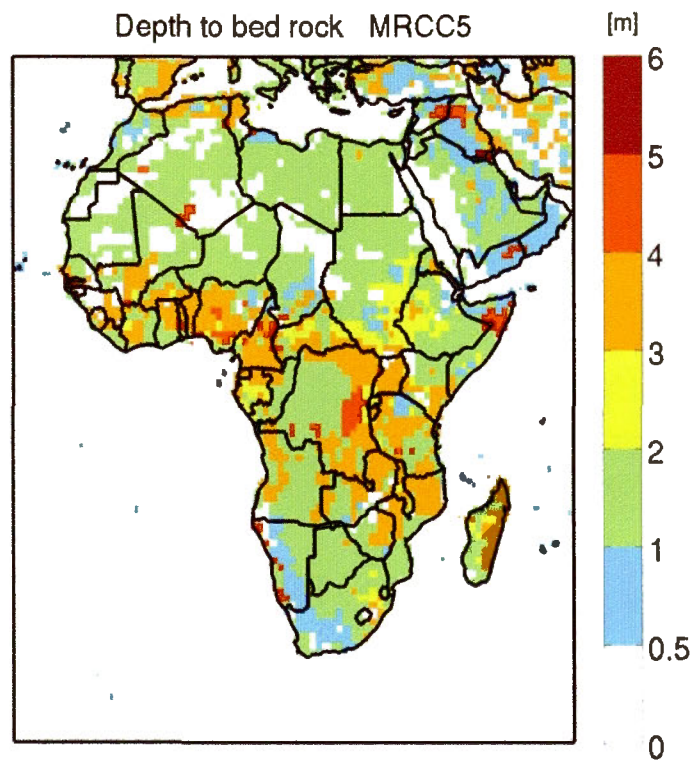


Fig.B.2 Profondeur du bedrock de l'Afrique utilisée par MRCC5
Source Webb et al. (1991)

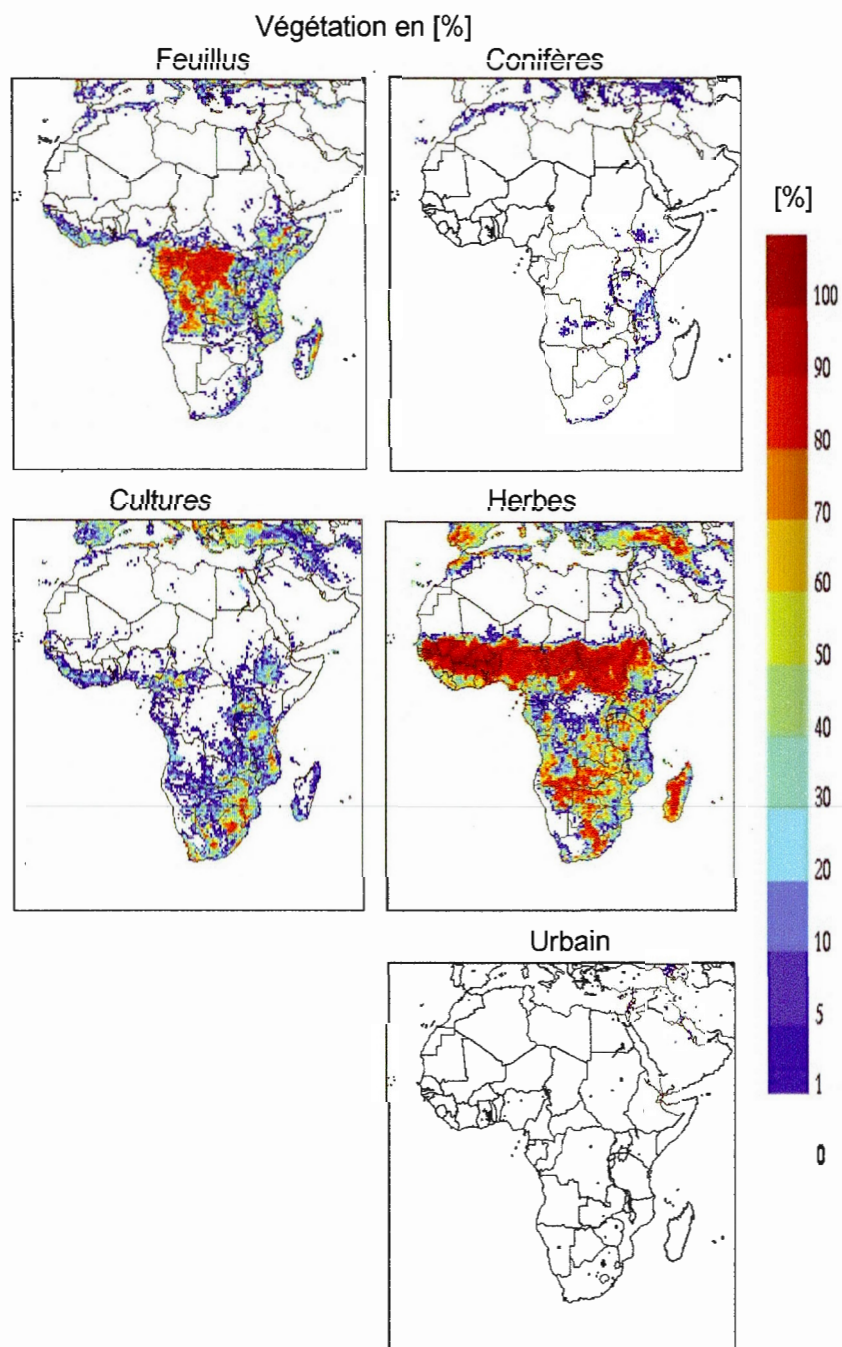


Fig.B.3 Fractions en [%] de la couverture des types de la végétation en Afrique utilisé par MRCC5

ANNEXE C

Précipitation et ratio drainage/(ruissellement total) - JFM

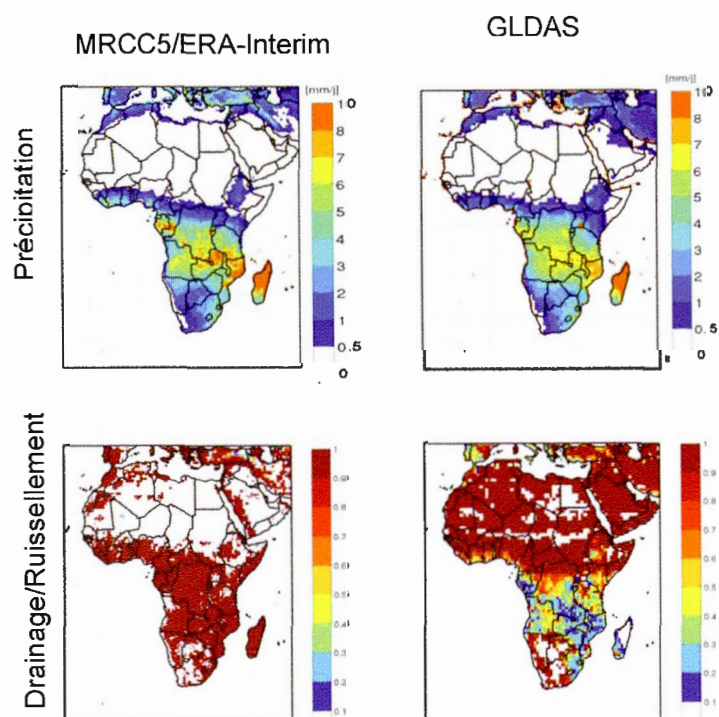


Fig.C.1 Moyenne saisonnière des précipitations (1984-2008) simulées par MRCC5/ERA-Interim (ligne 1, colonne 1), et assimilées par GLDAS (ligne 1, colonne 2) en JFM. Moyenne saisonnière du ratio drainage/ruissellement total simulé par MRCC5/ERA-Interim (ligne 2, colonne 1), et assimilé par GLDAS (ligne 2, colonne 2) en JFM

Précipitation et ratio drainage/(ruissellement total) - JAS

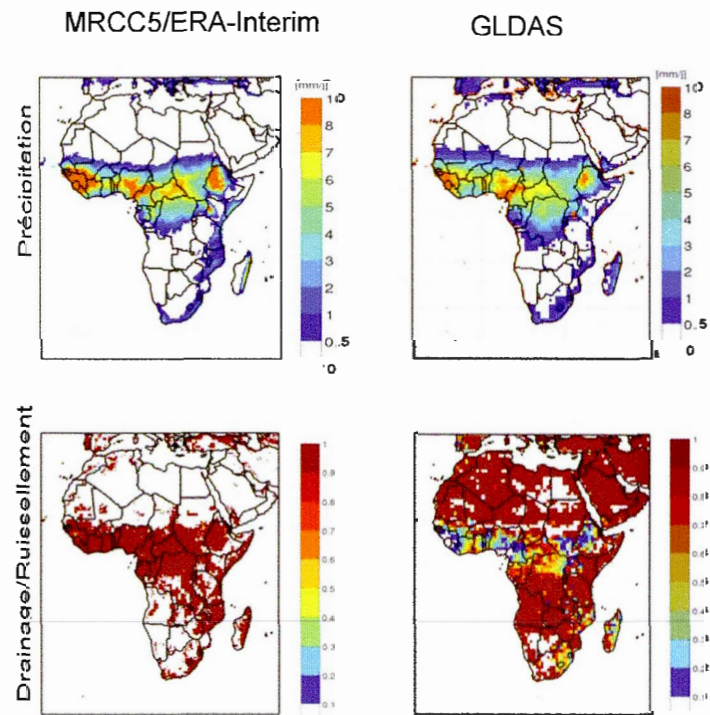


Fig.C.2 Moyenne saisonnière des précipitations (1984-2008) simulées par MRCC5/ERA-Interim (ligne 1, colonne 1), et assimilées par GLDAS (ligne 1, colonne 2) en JAS. Moyenne saisonnière du ratio drainage/ruissellement total simulé par MRCC5/ERA-Interim (ligne 2, colonne 1), et assimilé par GLDAS (ligne 2, colonne 2) en JAS

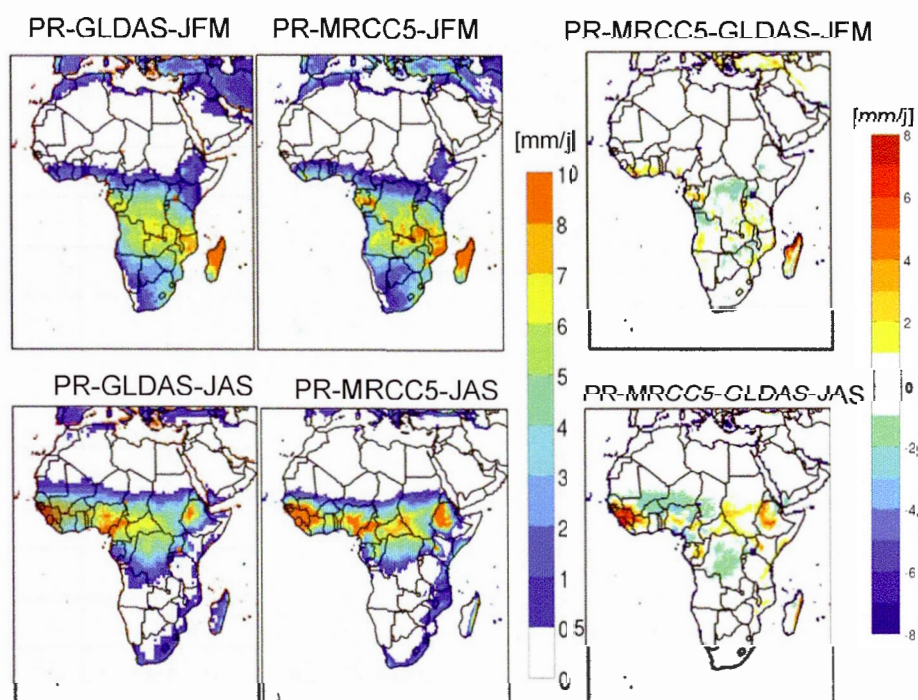


Fig.C.3 Moyenne saisonnière des précipitations (1984-2008) assimilées par GLDAS en JFM (ligne 1, colonne 1), en JAS (ligne 2, colonne 1) et simulées par le MRCC5/ERA-Interim en JFM (ligne 1, colonne 2), en JAS (ligne 2, colonne 2). La différence du MRCC5/ERA-Interim par rapport à GLDAS en JFM (ligne 1, colonne 3), en JAS (ligne 2, colonne 3)

ANNEXE D

Température de surface de la mer (SST) et les anomalies
correspondantes en JFM

MRCC5/ERA Interim

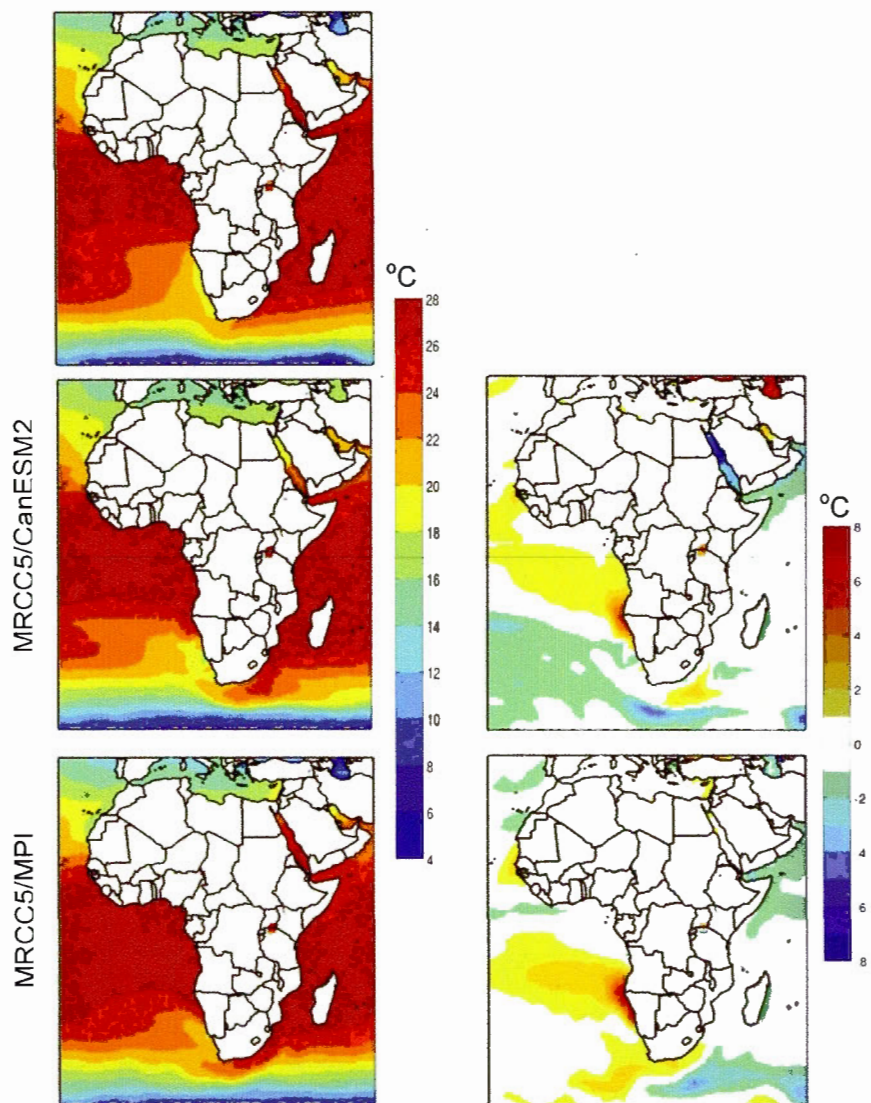
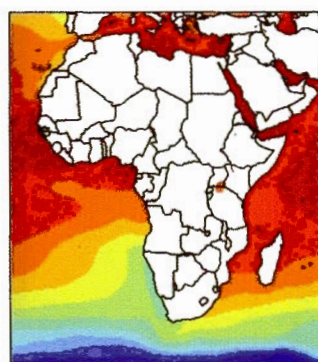


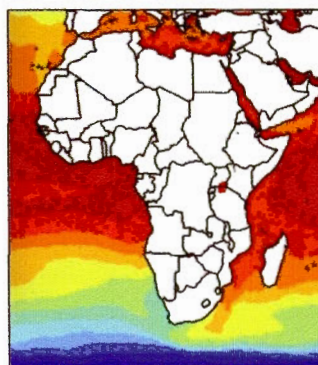
Fig.D.1 Moyenne saisonnière de la SST (1984-2008) en JFM simulée par le MRCC5/ERA-Interim (en haut à gauche), par MRCC5/CanESM2 (au milieu à gauche) et par MRCC5/MPI (en bas à gauche). La différence entre MRCC5/CanESM2 et MRCC5/ERA-Interim (au milieu à droite), entre MRCC5/MPI et MRCC5/ERA-Interim (en bas à droite)

Température de surface de la mer (SST) et les anomalies
correspondantes en JAS

MRCC5/ERA-Interim



MRCC5/CanESM2



MRCC5/MPI

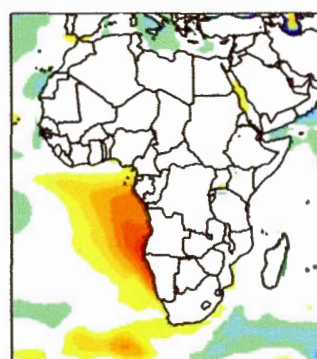
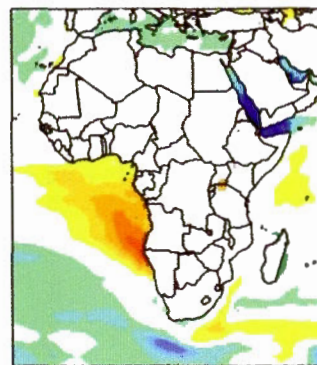
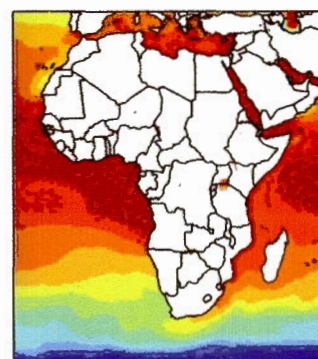


Fig.D.2 Moyenne saisonnière de la SST(1984-2008) en JAS simulée par le MRCC5/ERA-Interim (en haut à gauche), par MRCC5/CanESM2 (au milieu à gauche) et par MRCC5/MPI (en bas à gauche). La différence entre MRCC5/CanESM2 et MRCC5/ERA-Interim (au milieu à droite), entre MRCC5/MPI et MRCC5/ERA-Interim (en bas à droite)

Changements appréhendés de la moyenne saisonnière de la température
de surface de la mer (SST) en JFM

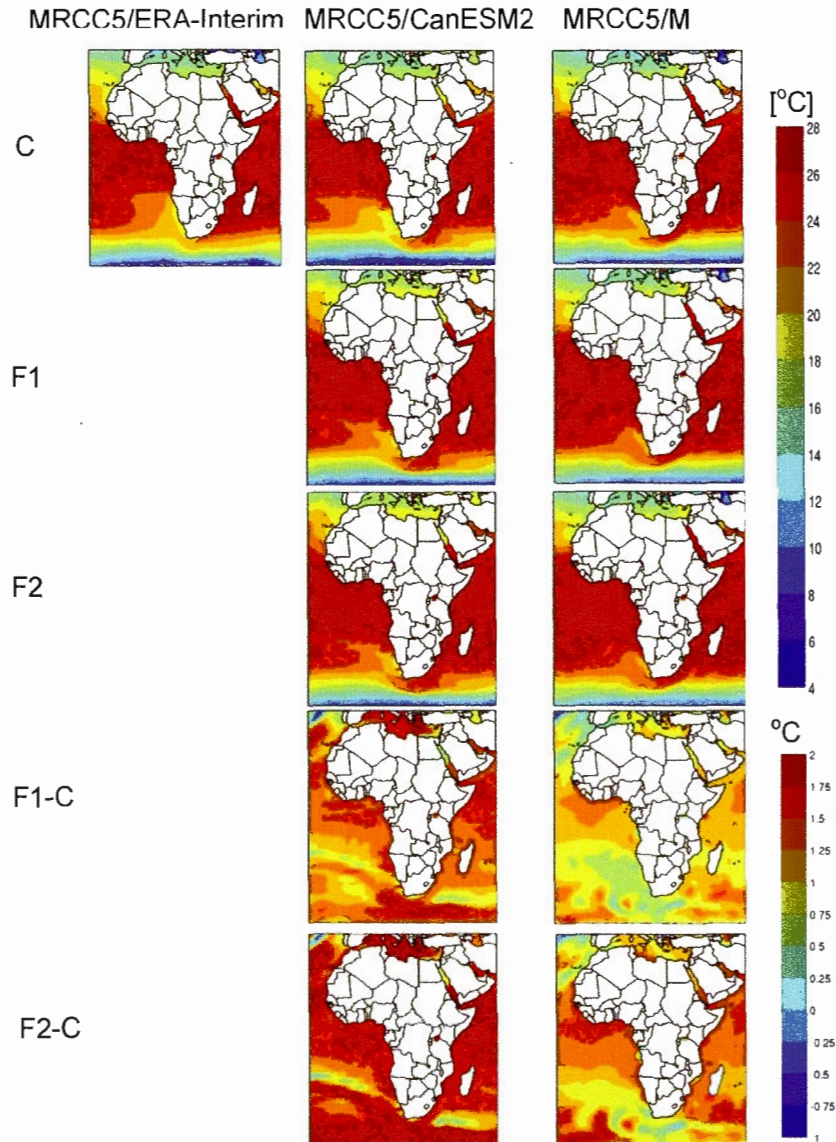


Fig.D.3 Moyenne saisonnière de la température de surface de la mer en JFM (1984-2008), simulée par MRCC5/ERA-Interim (colonne 1), par MRCC5/CanESM2 (colonne 2), et par MRCC5/MPI (colonne 3) pour la période courante C (ligne 1), la période futur 1 F1 (ligne 2) et la période futur 2 F2 (ligne 3). Les changements appréhendés de la moyenne saisonnière de la SST sont présentés durant la période F1 (ligne 4), et la période F2 (ligne 5)

Changements appréhendés de la moyenne saisonnière de la température
de surface de la mer (SST) en JAS

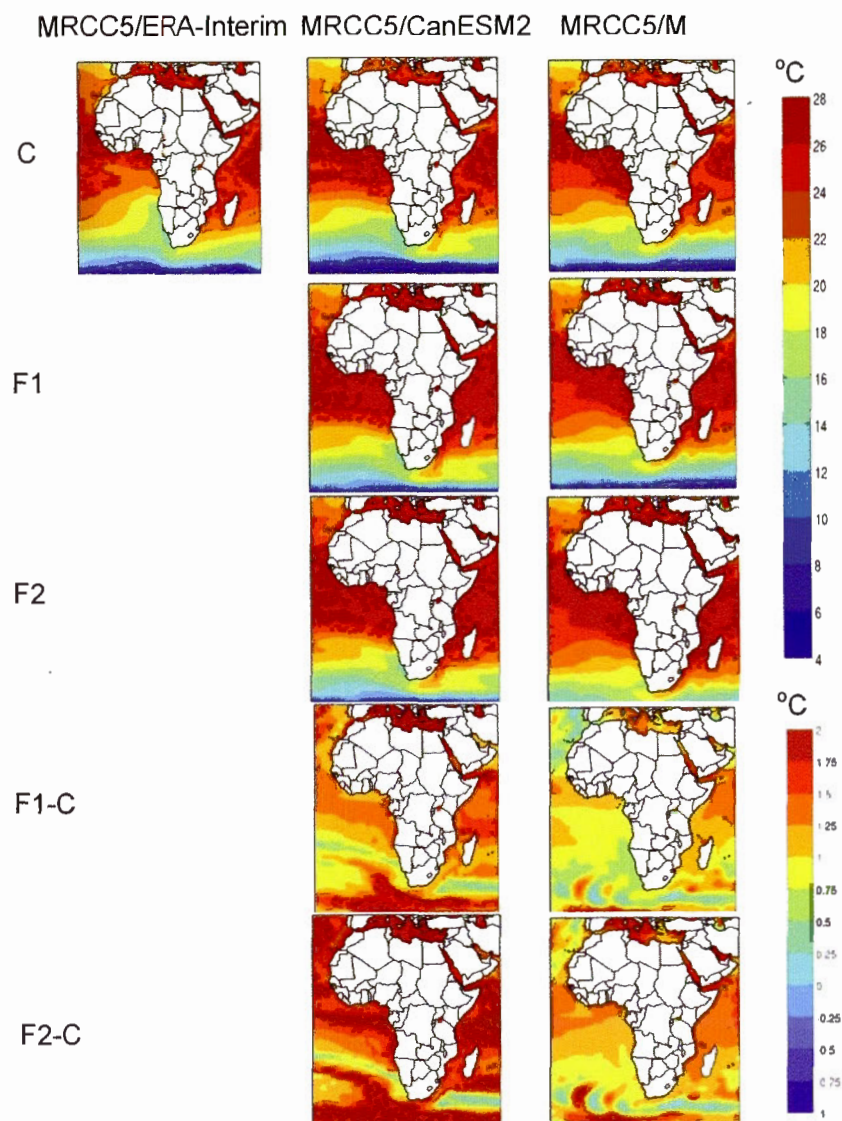


Fig.D.4 Moyenne saisonnière de la température de surface de la mer en JAS (1984-2008), simulée par MRCC5/ERA-Interim (colonne 1), par MRCC5/CanESM2 (colonne 2), et par MRCC5/MPI (colonne 3) pour la période courante C (ligne 1), la période futur 1 F1 (ligne 2) et la période futur 2 F2 (ligne 3). Les changements appréhendés de la moyenne saisonnière de la SST sont présentés durant la période F1 (ligne 4), et la période F2 (ligne 5)

[Cette page a été laissée intentionnellement blanche]

BIBLIOGRAPHIE

- Bélair S, Mailhot J, Girard C, Vaillancourt P (2005) Boundary layer and shallow cumulus clouds in a medium-range forecast of a large-scale weather system. *Mon Weather Rev* 133:1938–1960
- Benoît R, Côté J, Mailhot J (1989) Inclusion of a TKE boundary layer parameterization in the Canadian regional finite-element model. *Mon Weather Rev* 117:1726–1750
- Bouagila, B., and L. Sushama . On the current and future dry spell characteristics over Africa. *Atmosphere*. *Atmosphere* 2013, 4, 272-298; doi:10.3390/atmos4030272
- Burpee RW (1972) The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere of North Africa. *J Atmos Sci* 29:77–90
- Caya D., Laprise R. (1999). A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model: the Canadian RCM. *Monthly Weather Review* 127, 341-362.
- Cook KH (1999) Generation of the African easterly jet and its role in determining West African precipitation. *J Clim* 12:1165–1184
- Cook KH, Vizzy EK (2006) Coupled model simulations of the West African monsoon system: twentieth-century simulations and twenty-first-century predictions. *J Clim* 19:3681–3703
- Daisuke Nohara, Akio Kitoh, Masahiro Hosaka, and Taikan Oki, 2006: Impact of Climate Change on River Discharge Projected by Multimodel Ensemble. *J. Hydrometeor*, 7, 1076–1089. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM531.1>
- Delage Y (1997) Parameterising sub-grid scale vertical transport in atmospheric models under statically stable conditions. *Bound Layer Meteorol* 82:23–48
- Delage Y, Girard C (1992) Stability functions correct at the free convection limit and consistent for both the surface and Ekman layers. *Bound Layer Meteorol* 58:19–31
- Fahad Saeed, Andreas Haensler, Torsten Weber, Stefan Hagemann and Daniela Jacob, 2013, Representation of Extreme Precipitation Events Leading to Opposite Climate Change Signals over the Congo Basin, *Atmosphere*, doi:10.3390/atmos4030254.
- Fang H., H. K. Beaudoin, M. Rodell, W. L. Teng, B. E. Vollmer. Global Land Data Assimilation System (GLDAS) Products, Services and Application from NASA Hydrology Data and Information Services Center (HDISC). ASPRS 2009 Annual Conference Baltimore, Maryland, March 8-13, 2009.

- Fekete, B. M., C. J. Vorosmarty, W. Grabs. 2002. High-resolution fields of global runoff combining observed river discharge and simulated water balances, *Global Biogeochemical Cycles*, 16 (3): 15-1 to 15-10.
- Hernandez-Diaz L, Laprise R, Sushama L, Martynov A, Winger K, Dugas B (2012) Climate simulation over the CORDEX-Africa domain using the fifth generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Clim Dyn*. doi:10.1007/s00382-012-1387-z.
- Huffman, G.J.; Adler, R.F.; Morrissey, M.M.; Curtis, S.; Joyce, R.; McGavock, B.; Susskind, J. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *J. Hydrometeorol.* 2001, 2, 36–50.
- Joyce, R. J., J. E. Janowiak, P. A. Arkin, and P. Xie, 2004: CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J. Hydrometeorol.*, 5, 487–503.
- Kain JS, Fritsch JM (1990) A one-dimensional entraining/detraining plume model and application in convective parameterization. *J Atmos Sci* 47:2784–2802
- Koster RD, Sud YC, Guo Z, Dirmeyer PA, Bonan G, Oleson KW, Chan E, Versegny D, Cox P, Davies H, Kowalczyk E, Gordon CT, Kanae S, Lawrence D, Liu P, Mocko D, Lu CH, Mitchell K, Malyshev S, McAvaney B, Oki T, Yamada T, Pitman A, Taylor CM, Vasic R, Xue Y (2006) The global land-atmosphere coupling experiment. Part I: overview. *J Hydrometeorol* 7:590–610
- Kuo HL (1965) On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J Atmos Sci* 22:40–63
- Lafore JP, Flamant C, Giraud V, Guichard F, Knippertz P, Mahfouf J-F, Mascart P, Williams ER (2010) Introduction to the AMMA special issue on advances in understanding atmospheric processes over West Africa through the AMMA field campaign. *QJR Meteorol Soc* 136:2–7. doi:10.1002/qj.583
- Laprise R (1992) The Euler equation of motion with hydrostatic pressure as independent coordinate. *Mon Weather Rev* 120: 197–207
- Li J, Barker HW (2005) A radiation algorithm with correlated-k distribution. Part I: local thermal equilibrium. *J Atmos Sci* 62:286–309
- Maarten de Wit and Jacek Stankiewicz, 2006. Changes in Surface Water Supply Across Africa with Predicted Climate Change. *Science* 311 (5769), 1917-1921. Published online 2 March 2006 [DOI:10.1126/science.1119929]
- Martynov A, Sushama L, Laprise R, Winger K, Dugas B (2012) Interactive lakes in the Canadian Regional Climate Model, version 5: the role of lakes in the regional climate of North America. *Tellus A* 64:16226. doi:10.3402/tellusa.v64i0.16226

- Martynov, A., R. Laprise, L. Sushama, K. Winger, L. Šeparović and B. Dugas, 2013: Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model, version 5: Model performance evaluation. *Clim. Dyn.*, <http://link.springer.com/article/10.1007/s00382-013-1778-9>
- McFarlane NA (1987) The effect of orographically excited gravitywave drag on the circulation of the lower stratosphere and troposphere. *J Atmos Sci* 44:1175–1800
- Mironov, D., Heise, E., Kourzeneva, E., Ritter, B., Schneider, N. and co-authors. 2010. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environ. Res.* 15, 218–230.
- Mitchell TD, Carter TR, Jones PD, Hulme M, New M (2004) A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100). Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich, working paper 55.
- Mitchell TD, Jones PD (2005) An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated highresolution grids. *Int J Climatol* 25:693–712
- Nikulin G, Jones C, Giorgi F, Asrar G, Büchner M, Cerezo-Mota R, Christensen OB, Déqué M, Fernandez J, Hänsler A, van Meijgaard E, Samuelsson P, Sylla MB,
- Parker DJ, Burton RR, Diongue-Niang A, Ellis RJ, Felton M, Taylor CM, Thorncroft CD, Bessemoulin P, Tompkins AM (2005a) The diurnal cycle of the West African monsoon circulation. *QJR Meteorol Soc* 131:2839–2860
- Parker DJ, Thorncroft CD, Burton RR, Diongue-Niang A (2005b) Analysis of the African easterly jet using aircraft observations from the JET2000 experiment. *QJR Meteorol Soc* 131:1461–1482. doi:10.1256/qj.03.189
- René Laprise, Leticia Hernandez-Diaz, Kossivi Tete, Laxmi Sushama, Leo Šeparović, Andrey Martynov, Katja Winger, Michel Valin, 2013. Climate projections over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Clim Dyn.* DOI 10.1007/s00382-012-1651-2.
- Ross S. (2004) Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists 3rd edition. Elsevier, 641 pp.
- Sturm M, Holmgren J, KÄnonig M and Morris K 1997 The thermal conductivity of seasonal snow; *J. Glaciol.* 43(143) 26–41.
- Sundqvist H, Berge E, Kristjansson JE (1989) Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model. *Mon Weather Rev* 117:1641–1657
- Sushama L (2012) Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *J Clim.* doi:10.1175/JCLI-D-11-00375.1.

- Sushama, L., Laprise, R., Caya, D., Frigon, A., Slivitzky, M., 2006. Canadian RCM projected climate-change signal and its sensitivity to model errors. *Int. J. Climatol.* doi:10.1002/joc.1362.
- Sylla MB, Coppola E, Mariotti L, Giorgi F, Ruti PM, Dell'Aquila A, Bi X (2010) Multiyear simulation of the African climate using a regional climate model (RegCM3) with the high resolution ERA-Interim reanalysis. *Clim Dyn* 35:231–247. doi: 10.1007/s00382-009-0613-9.
- Thorncroft CD, Blackburn M (1999) Maintenance of the African easterly jet. *QJR Meteorol Soc* 125:763–786
- Thorncroft CD, Nguyen H, Zhang C, Peyrille P (2010) Annual cycle of the West African monsoon: regional circulations and associated water vapour transport. *QJR Meteorol Soc* 137:129–147. doi:10.1002/qj.728
- Verseghy LD (2000) The Canadian land surface scheme (CLASS): its history and future. *Atmos Ocean* 38:1-13
- Verseghy LD (2008) The Canadian land surface scheme: technical Documentation-version 3.4. Climate Research Division, Science and Technology Branch, Environment Canada
- Vorosmarty C. J., B. M. Fekete, M. Meybeck and R. B. Lammers. Global System of Rivers: Its role in organizing continental land mass and defining land-to-ocean linkages. *Global Biogeochemical Cycles*, Submitted, 1999.
- Webb RS, Rosenzweig CE, Levine ER. 1991. A global data set of soil particle size properties, NASA Tech. Memo., 4286, 34 pp
- Zadra A, McTaggart-Cowan R, Roch M (2012) Recent changes to the orographic blocking. Seminar presentation, RPN, Dorval, Canada, 30 March 2012. http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/SEM/dossiers/2012/seminaires/2012-03-30/Seminar_2012-03-30_Ayrton-Zadra.pdf. Accessed 19 July 2012
- Zadra A, Roch M, Laroche S, Charron M (2003) The subgrid scale orographic blocking parametrization of the GEM model. *Atmos-Ocean* 41(2):155–170